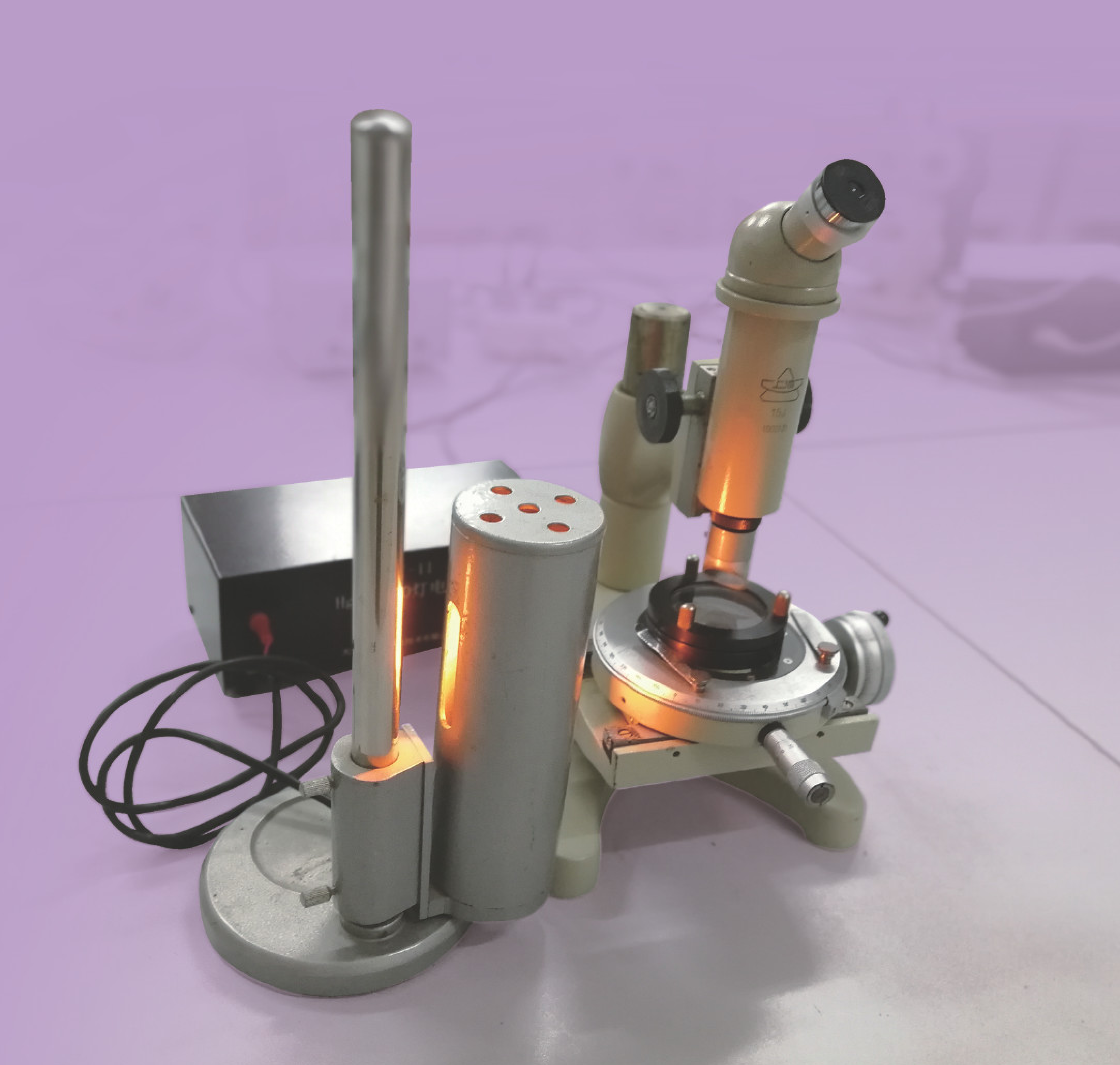
21世纪应用型高等院校教材

# 大学物理实验

陈春彩 主编　陈源福 林二妹 副主编

清华大学出版社



# 大学物理实验

陈春彩　主编
陈源福　林二妹　副主编

清华大学出版社
北 京

## 内容简介

本书是依照教育部《非物理专业大学物理实验课程教学基本要求》，根据应用型本科院校的特点，结合编者多年大学物理实验教学经验所编写的教材。

全书共分5章，27个实验，按照“基础性实验、提高性实验和综合设计性实验”三个层次课程体系构筑了本书的框架。书中除收录了一些经典的实验外，还适当编入了设计性、应用性和探索性的综合实验。此外，教材中给出相应的物理实验的关键英文词汇，有意识地进行英语专业词汇的介绍，以帮助学生们更好地阅读英文文献。

本书可作为应用型本科高等院校工科各专业的大学实验物理课教材，也可作为相关人员的参考用书。



**图书在版编目(CIP)数据**

大学物理实验/陈春彩主编. —北京：清华大学出版社，2018
ISBN 978-7-302-50926-4

Ⅰ. ①大…　Ⅱ. ①陈…　Ⅲ. ①物理学－实验－高等学校－教材　Ⅳ. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第189273号

**责任编辑**：朱红莲
**封面设计**：傅瑞学
**责任校对**：刘玉霞
**责任印制**：宋　林

**出版发行**：清华大学出版社
**网　　址**：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
**地　　址**：北京清华大学学研大厦A座　　**邮　　编**：100084
**社 总 机**：010-62770175　　**邮　　购**：010-62786544
**投稿与读者服务**：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
**质量反馈**：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
**印 装 者**：北京国马印刷厂
**经　　销**：全国新华书店
**开　　本**：185mm×260mm　　**印　　张**：10.75　　**字　　数**：260千字
**版　　次**：2018年10月第1版　　**印　　次**：2018年10月第1次印刷
**定　　价**：29.00元

产品编号：080527-01

# 前言

# FOREWORD

本书依照教育部《非物理专业大学物理实验课程教学基本要求》，根据应用型本科院校的特点，结合编者多年大学物理实验教学经验编写而成。

全书共5章。第1章系统地介绍了大学物理实验课程的基本要求、任务及其考核方式；第2章较为全面地阐述了测量误差、不确定度及数据处理的基础知识；第3章是基础实验；第4章是提高性实验；第5章则是综合设计性实验。

本教材编写的主要特点是：

1. 结合应用型本科院校学生文化基础知识差异较大的特点，为满足对基础不同的学生的培养需求，构建了面向非物理专业工科本科生的分层次、组合式、模块化的大学物理实验课程体系，突破传统的力、热、电、磁、光及近代物理的排列顺序，把整个实验教学过程分为基础性实验、提高性实验和综合设计性实验三个层次。从简单到复杂，由浅到深，从学习知识到培养综合能力，逐步提高学生的实验技能。

2. 在内容叙述上，力求做到实验目的明确，原理叙述清楚，实验内容安排得当，步骤详尽。在每个基础性实验项目后设有数据处理要求和思考题，着重训练学生的物理实验数据处理方法。

3. 教材中给出了相应的物理实验的关键英文词汇，有意识地进行英语专业词汇的渗透，每堂课所渗透的词汇量是分散式的，学生习得的方式是沐浴式的，既能丰富学习内容，又加深学生对物理知识的理解和记忆。英语词汇内容还可作为学生拓展内容，删除也不影响整本书的完整性和连续性。

实验课教学是一项集体的事业，从实验内容的确定、项目的建设、实验讲义的编写，到实验教学内容的完成，都凝聚着大学物理教研室全体教师和实践中心相关实验技术人员的智慧和劳动成果。在本书的编写过程中得到了闽南理工学院领导的大力支持，得到了陈春荣老师的悉心指导。全书由陈春彩担任主编，陈源福、林二妹为副主编，对本书出版付出努力和提出宝贵建议的人有：陈春荣、骆明辉、陈荣泉、施一峰、郑亚玉、彭川来、王丽君、章进炳等，编者在此表示深深的感谢！对本书内容沉淀做出贡献的所有教师表示衷心的感谢！本书的编写工作得到了外国语学院郑小娟老师的大力支持，在此一并表

示深深的谢意！同时，并向本书编写过程中参阅的书籍、文献的作者表示感谢！

本书的作者分工如下：

陈春彩负责统稿和编写前言、第1章、第2章、第3章的实验一～实验八；陈源福编写第3章的实验十一～实验十六；林二妹编写第3章的实验九、实验十、第4章、第5章及附表部分。

由于编者水平有限，时间仓促，书中不足之处在所难免，恳请有关老师和读者批评指正，以便今后再版时订正，使我们的教材在使用中不断完善。

编　者

2018年5月

于闽南理工学院

# 目录

CONTENTS

# 第1章

# 绪　　论

## 1.1　物理实验的地位和作用

物理学是一门基础自然科学，它研究物质存在的基本形式及其内部结构和物质运动的基本规律。物理学的基本理论渗透到自然科学的许多领域，应用于生产技术的各个部门，它是自然科学的许多领域和工程技术的基础。它对人类未来的进步起着关键的作用，纵观整个近代文明史，物理学的每一次重大突破，都对社会生产力的发展产生决定性的影响。热力学的创立与应用，促进了以蒸汽机为代表的第一次工业革命；电磁学的发展与完善，产生了以电气化为特征的第二次工业革命；20世纪以来物理学的一系列重大进展和突破，把人类社会带入了计算机、激光、太空、核能、生物工程等高新技术的今天。所以说人类生活和物理学息息相关。

“物理学是以实验为本的科学”这一精辟论述来自诺贝尔物理学奖获得者、理论物理学家杨振宁教授的一则题词，它表达了物理学界的共同见解，抓住了物理学的根本特征。在物理学的发展中，无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都要取决于实验。例如，伽利略用实验否定亚里士多得“力是维持物体运动的原因”的论断；杨氏双缝干涉实验验证了光的波动性；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认；卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验揭开了原子的秘密；迈克尔孙-莫雷实验证实了“以太”的不存在。等等事例中，实验都起了决定性的作用。另外，实验还是物理理论演变、发展的动力。例如，20世纪初迈克尔孙-莫雷干涉实验的零结果不能很好地被经典物理学所解释，在此基础上爱因斯坦建立了相对论；黑体辐射和光电效应等一系列实验事实与经典物理理论严重矛盾，导致了量子力学的产生。同时，实验也是理论付诸应用的桥梁。热核聚变指出，通过热核聚变可以获得巨大的能量，但是想要很好地利用它，还需要通过许多艰苦的实验才能实现。当然，科学实验不仅是理论研究活动的基础，也离不开理论的指导。实验研究课题的选择，实验的构思和设计，实验方法的确定，实验数据的处理，以及由实验结果中提出的科学假设和科学结论，等等，都始终受理论所支配。物理学的发展是在实验和理论相互推动、密切结合下进行的，实验和理论在物理学中具有同等重要的地位。

物理实验是实验科学的重要组成部分，它的方法具有一定的普遍性，今后在探索和开拓新的科技领域的过程中，物理实验仍然是一个有力的工具。所幸的是，在物理学发展过程

中，人类积累了丰富的实验方法，创造出各种精巧的仪器设备，涉及广泛的物理现象，这就使物理实验课有了充实的教学内容。大学物理实验是理工科学生进行科学基础训练的重要实践环节，是和大学物理并行开设的一门独立的必修的基础课程，是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。理工科学生学好物理学和物理实验，将会观察到许多生动的自然现象，获得进行科学实验的基本技能和经验，提高分析问题和解决实际问题的能力，对后继专业课程的学习以至从事科学技术工作将起到重要的作用。

## 1.2 物理实验课的教学目的

物理实验课是一门实践性课程，它的教学培养目标是：

（1）通过物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量，使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和技能，并能运用物理原理、物理实验的方法来研究物理现象，总结物理规律，加深对物理原理的理解。

（2）培养和提高学生科学实验能力。包括：①自学能力，要求能够自行阅读教材或参考资料，正确理解实验内容，做好实验前的准备。②动手能力，要求能够借助教材和仪器说明书，正确调整和使用常用仪器设备。③表达书写能力，要求能正确记录和处理实验数据，绘制表格，说明实验结果，撰写合格的实验报告。④使学生初步具备运用物理学理论，对实验现象进行初步的分析和判断的思维能力。⑤初步的设计能力，对学有余力的学生，要求能够根据课题的需要，对简单的实验题目，确定实验方法和实验条件，合理选择仪器，拟定实验步骤，写出实验注意事项。

（3）培养和提高学生从事科学实验的素质。包括理论联系实际和实事求是的科学作风；严肃认真的工作态度；不怕困难，主动进取的探索精神；遵守操作规程，爱护公共财物的优良品德。

实验能力和良好的习惯作风是通过每一个具体实验逐步培养起来的，因此要求每个同学应认真对待每一次实验，认真做好每一个实验。

## 1.3 物理实验的基本环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动，要求学生投入较大的精力，并且具有较强的独立工作能力。学好物理实验课的关键在于把握以下几个基本环节。

**1. 课前预习(preparation before experiment)**

首先根据每学期学校下发的课程表，找到自己所在实验组该轮次应该做的实验项目，仔细阅读实验教材的相关内容，也可借助计算机网络事先对相关知识进行预习和实验前的准备，并把预习报告事先写在实验报告的相关栏目上。预习报告的内容包括以下几个部分：

（1）实验名称。

（2）实验目的。简要说明实验所要解决的主要问题。

（3）实验原理。简要阐述实验所依据的物理定律或主要公式，包括必需的文字叙述、原理图、公式及公式的推导或公式说明。

（4）实验仪器。说明所用仪器的型号、规格和量程。

(5) 实验注意事项。做实验前必须牢记该实验的注意事项,否则会造成仪器损坏,甚至人身事故。

(6) 实验步骤和主要内容。要求学生清楚实验的操作程序,对所测的内容尽量做到心中有数。

(7) 数据记录表格。根据实验操作步骤,提前设计好测量数据记录表格,并绘制在实验报告上,以便实验过程中随时将实验数据按顺序填入表中。也方便随时观察和分析数据的规律性。

另外,由于实验课的课内时间有限,而熟悉仪器和测量数据的任务一般都比较繁重,因此,进入实验室前,老师将对预习报告进行检查,发现预习情况不合格者或未做预习报告者,将取消本次实验资格。

**2. 课堂实验(classroom experiment)**

实验开始前,首先要结合仪器实物,对照实验教材或仪器说明书,认识和熟悉仪器,了解仪器的工作原理和使用方法;其次要全面仔细地想一想实验的操作程序,不要急于动手。依照确定的实验步骤,按照要求安装和调整好仪器。使用仪器进行测量时,必须满足仪器的正常工作条件(如天平调水平和平衡、螺旋测微器的调零等)。测量时,应集中精力、细心操作、仔细观察,并立即将实验数据记录在规定的实验数据表格内。要根据仪器的最小刻度单位或准确度等级来定实验数据的有效数字位数和单次测量误差,不允许无谓地丢失有效数字位数。如果确实是记错了或者重做测量时,也不要将原记录涂涂改改,而是用笔在原记录上画一横线,更改后的数据应填写在清晰的空位上,或另画表格记录。记录数据要实事求是,不允许弄虚作假。抄袭别人的记录,或为凑合"理想"的结果而修改测量数据,是一种反科学的行为,一经发现,将按不合格处理。

实验数据是否合理,学生应首先自查,然后交给指导老师审阅、签字。实验完毕,应自觉整理好仪器,并做好清洁工作。

**3. 实验报告的书写(writing the experiment report)**

书写实验报告的目的是为了培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力。实验报告要求文字通顺、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确。

一份完整的实验报告应包括:①实验名称;②实验目的;③实验原理;④实验仪器;⑤注意事项;⑥实验步骤;⑦原始实验数据记录;⑧数据处理与讨论等内容。对于①~⑥都是预习的内容,要求在实验前写好,必要时在实验课后进行修正和补充。原始实验数据记录是现场记录的原始凭证。课后,不允许在它上面做任何修改,也不允许将它作为计算表格。实验报告纸上必须重新列出数据表格,将记录的实验数据重新列于表中,并将原始记录单附在实验报告中。数据处理要写出数据计算的主要过程、误差分析和最终的实验结果,有些实验还需绘制图表等。对实验过程和结果的讨论内容一般不限,可以是实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可以是教材里的思考题。

大学物理实验课程的实验报告应在该实验后的下一次实验课交给指导老师进行批改。

**4. 考试(examination)**

大学物理实验成绩由两部分组成,即平时成绩和期末考试卷面成绩。平时成绩由预习、实验课堂纪律、操作技能、实验报告的成绩确定,原则上占总成绩的70%。考试卷面成绩占

30%，但是不参加期末考试者，总成绩为不合格。期末考试形式是抽签开卷考试，考试时间每人40分钟，内容一般是所有必修实验中随机抽取一个按考试卷面要求进行现场实验操作和相关数据处理等。

## 1.4 物理实验室规则

（1）学生进实验室前需带上预习报告，经教师检查同意后方可进行实验。

（2）遵守课堂纪律，不得无故旷课，不得迟到，不得随意串组、换位置，注意保持实验室的安静和卫生。如遇到仪器发生故障应及时报告老师。

（3）爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器，实验中严格按照实验教材或仪器说明书操作，如有损坏，应填写损坏报告并按学校规定赔偿。公用工具用完后应立即放回原处。

（4）做完实验，应交给指导老师检查，教师在原始记录上签字后，才能整理仪器，离开实验室。

（5）及时上交实验报告。

# 第2章

# 测量误差与数据处理

研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量，测量是物理实验的基础。然而任何测量都存在一定误差，要评价测量结果的可信程度，必须对测量误差做出估计。误差理论及数据处理是一切实验结果中不可缺少的内容，是不可分割的，因此，误差分析和数据处理是物理实验课的基础。由于这部分内容牵涉面较广，对学生来说难度较大，而且这方面问题的深入探讨和详细证明是数理统计学的任务，所以这里仅限于简要介绍这方面的初步知识，引用几个重要概念以及最一般情况下的处理方法，并作简化处理，不进行严密的数学论证，减少学习的难度，有助于学好物理实验这门基础课程。

## 2.1 测量与误差

### 2.1.1 测量

测量是把被测量的物理量与选定的同类单位量进行比较。例如，测量一本书的长度，将书与米尺进行比较，书的长度是米尺的 17.65%，则书的长度为 17.65cm，或 0.1765m。测量结果的数值大小和选择的单位有密切关系。同一个量，测量时选择的单位越小，结果数值就越大，所以任何测量结果都必须标明单位。测量值用一个没有单位的纯数表示是毫无意义的。

测量分为**直接测量**与**间接测量**。

**直接测量**(**direct measurement** )是指能用仪器直接将待测量与选定的同类单位进行比较，即直接在仪器上读出待测量的值。例如，用米尺测量长度；用天平称质量；用秒表测时间等。

**间接测量**(**indirect measurement** )是指不能用仪器直接测量出结果，而是由若干直接测量量通过一定的函数关系(公式、定律)进行计算从而求出待测量。如直接测出摆长 $l$ 及周期 $T$，通过公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$，求出重力加速度 $g$。

**等精度测量**(**measurement for equal precision** )：在同一条件下，对同一物理量的多次测量称为等精度测量。若测量条件发生变化则为不等精度测量。我们所讨论的测量均为等精度测量。

### 2.1.2 测量的误差

**真值**(**truth-value** )是指待测量客观的真实值,**测量值**(**measured value** )是指通过测量得到的待测量的数值。测量值与真值之间总是存在着差异,我们把这个差异称为测量误差。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

测量值 $x$ 与真值 $X$ 之差称为**绝对误差**(**absolute error**)$\Delta x$,简称误差。即:绝对误差=测量值－真值,用公式表示如下:

$$\Delta x = x - X \tag{2-1}$$

**相对误差**(**relative error**)指绝对误差 $\Delta x$ 与真值 $X$ 的比,用 $E_r$ 表示,即

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \tag{2-2}$$

测量的误差按产生的原因和性质分为两类:系统误差、随机(偶然)误差。

**系统误差**(**systematic error**):公式与定律不严格;仪器本身的缺陷;实验者自身的不良习惯等原因而产生的误差。

**随机(偶然)误差**(**random error**):由许多不稳定的偶然因素而产生的误差。例如,测量环境温度、气压的偶然变化,电流或电压的起伏波动等偶然因素引起的误差。在测量次数足够多的情况下,随机误差服从一定的统计规律,测量结果总是在真值附近。

### 2.1.3 误差的处理

要进行测量就会有误差存在,要测量得准确,就需要减少或消除测量误差。

**1. 系统误差的处理**

可以通过修订公式或定律,改进仪器,纠正不良习惯等来消除或减小系统误差。

**2. 随机误差的处理**

1) 随机误差的统计规律

理论与实践均表明一组等精度测量数据的随机误差服从一定的统计规律,最常见的统计规律是正态(高斯)分布。如图 2-1 所示:横坐标为误差 $\Delta x$,纵坐标为误差出现的概率密度 $f(\Delta x)$。

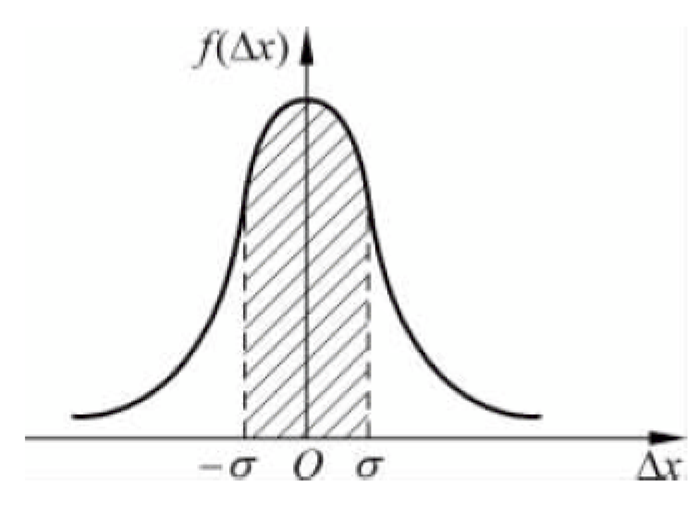



图 2-1 正态分布的误差曲线

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i)^2}{n}} \quad (n \to \infty) \tag{2-3}$$

这里,$\sigma$ 称为测量列 $x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n$ 的标准误差。

图 2-1 中阴影部分的面积是测量列 $x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n$ 中的任意测量值落在区间 $(X-\sigma, X+\sigma)$ 中的概率,其值的大小为 68.3%。

式(2-3)是测量次数为无限次时的标准误差公式。由于实际测量中,测量次数只能是

有限次,而且被测量的真值也不可能准确知道,因此这一标准误差公式只具有理论意义。

2) 随机误差的实际估算

设在一组测量中,$n$ 次测量的测量值分别为 $x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots,x_n$,其真值的最佳估计值是它们的**算术平均值**(**arithmetic mean value**),即

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{2-4}$$

从统计意义来说,算术平均值最接近真值。

各次测量值 $x_i$ 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差称为各次测量的**偏差**(deviation)或**残差**(residual),即

$$v_i=x_i-\bar{x} \tag{2-5}$$

偏差 $v_i$ 是在有限次测量的情况下,用算术平均值代替真值计算出现的误差。偏差与误差不同,标准误差多用于理论分析,而实际的误差估算则使用偏差。

由于 $v_i$ 可知,而 $\Delta x_i(\Delta x_i=x_i-X)$ 不可知,因此只能用偏差代替误差计算,测量列 $x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots,x_n$ 标准误差的估计值称为**标准偏差**(**standard deviation**),用 $S$ 表示,即

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{2-6}$$

式(2-6)称为**贝塞尔公式**(**Bessel Formula**),它是求实验标准偏差的常用计算公式。

注:可以证明,当测量次数 $n\to\infty$ 时,

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i^2}{n}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{2-7}$$

3) 算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差

从统计意义来说,算术平均值 $\bar{x}$ 比每一测量值更接近真值,但算术平均值 $\bar{x}$ 也是一个随机变量,即完全相同的条件下,进行 $m$ 组有限的 $n$ 次重复测量的平均值不尽相同,也具有离散性,因此也存在标准偏差。可以证明算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S(\bar{x})$ 为

$$S(\bar{x})=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}}=\frac{S}{\sqrt{n}} \tag{2-8}$$

$S(\bar{x})$ 表示在 $[\bar{x}-S(\bar{x}),\bar{x}+S(\bar{x})]$ 范围内包含真值 $X$ 的概率为 68.3%。在实际中,常用 $S(\bar{x})$ 作为测量结果随机误差的估算式。

## 2.2　测量不确定度简介

在测量中始终会存在着误差,被测量的真值实际上是无法知道的,因此根据误差的定义,测量误差是测量值与真值之差,自然也无法求出。测量不但要得到被测量的最佳估计值,而且要对其可靠性做出评价。

**不确定度**(**uncertainty**)是指由于误差的存在而对被测量不能肯定的程度,是对被测量

的真值以一定概率落在某一量值范围内的一个评定。也就是说,不确定度是与测量相联系的一种参数,用于表征测量值的可能的分散情况。显然,不确定度小,测量结果可信程度高;不确定度大,测量结果可信程度低。

误差与不确定度的区别:误差定义为测量值与真值之差,真值不可知,则误差也就无法知道。通过估算,可以得到标准偏差等量,但它们并不能表示测量结果误差数值的大小,只是表示测量结果的不确定性。与误差的定义不同,不确定度是可观测量,误差是不可观测量。

### 2.2.1 测量不确定度的分类

测量不确定度按评定方法的不同分为两大类。

**1. A 类不确定度(type A uncertainty)**

凡是可以通过统计方法计算的不确定度称为 A 类不确定度,用 $u_A$ 表示。在物理实验中约定 A 类不确定度取算术平均值的实验标准偏差,即

$$u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{2-9}$$

**2. B 类不确定度(type B uncertainty)**

凡是不能通过统计方法计算,只能通过其他方法估算的不确定度称为 B 类不确定度,用 $u_B$ 表示。在物理实验中约定 B 类不确定度是将测量仪器的误差限 $\Delta_{仪}$ 折合成等价的标准偏差。仪器的误差限一般在仪器的说明书中注明(表 2-1),并约定仪器误差均匀分布,则仪器的 B 类不确定度 $u_B$ 为

$$u_B = \Delta_{仪} / \sqrt{3} \tag{2-10}$$

**表 2-1 物理实验中的仪器误差限(正确使用仪器)$\Delta_{仪}$**

| 仪　　器 | $\Delta_{仪}$ 或其计算参数 | 备　　注 |
|---|---|---|
| 米尺(最小刻度 1mm) | 0.5mm | |
| 游标卡尺(20,50 分度) | 最小分度值(0.05mm,0.02mm) | |
| 螺旋测微计(0～50mm) | 0.004mm | |
| 物理天平(0.1g ) | 0.05g | |
| 各类数字仪表 | 仪器最小读数 | |
| 分光计 | 最小分度值(30″,1′) | |
| 电磁仪表(指针式) | $(AK)\%$ | $A$——量程,$K$——准确度等级 |

仪器的误差限在仪器出厂时会在说明书中标注或可在某些技术标准中查到:

(1) 在仪器上直接标出或用准确度表示;如 50 分度的游标卡尺的分度值为 0.02mm,其 $\Delta_{仪}$ =0.02mm;

(2) 给出仪器的准确度级别，然后算出 $\Delta_{仪}$。如常用电学指针式仪表所用的量程为 $A$，准确度等级为 $K$，则 $\Delta_{仪}=A\cdot K\%$。例如，0.5 级 mA 表的量程为 10mA 时，仪器的误差限为

$$\Delta_{仪}=10\times 0.5\%=0.05(\mathrm{mA})$$

若未注明仪器误差限或仪器误差限不清楚，则按如下规定：能连续读数(可对最小分度下一位进行估计)的仪器，取最小分度的一半作为仪器的误差限，如米尺、读数显微镜等；不能连续读数或指针跳跃式移动的仪器，其最小分度为仪器误差限，如机械秒表、数字仪表等。

### 2.2.2　不确定度的合成与相对不确定度

测量不确定度一般包括若干个分量，将这些分量合成后的不确定度称为合成标准不确定度，用符号 $u_x$ 表示，下标 $x$ 为测量物理量的符号。正确反映测量的不确定度，不能简单地将 $u_A$ 和 $u_B$ 代数相加，最合理的合成方法是"方和根"合成法。

若两类不确定度各分量 $u_{A1},u_{A2},\cdots,u_{Ai}$ 和 $u_{B1},u_{B2},\cdots,u_{Bi}$ 彼此独立，则测量结果的**合成标准不确定度(combined standard uncertainty)** $u_x$ 为

$$u_x=\sqrt{\sum_i(u_{Ai})^2+\sum_i(u_{Bi})^2} \tag{2-11}$$

对正态分布而言，合成标准不确定度的置信概率只有 68.3%。

实际测量中经常用扩展不确定度来表达测量的不确定度。对不确定度进行适当的扩大后可以达到更大的置信概率。扩展不确定用符号 $U_x$ 表示，它是合成不确定度的倍数，即 $U_x=ku_x$，式中 $k$ 为置信因子，可取 1、2、3。

对于测量结果，有时根据需要也有用相对不确定度补充说明测量的不确定度。**相对不确定度**(relative uncertainty)用符号 $E_x$ 表示，定义为

$$E_x=\frac{u_x}{\bar{x}}\times 100\% \tag{2-12}$$

即相对不确定度等于合成不确定度与被测量的算术平均值之比。

## 2.3　测量结果表示

测量的目的是确定被测量的值或获取测量结果，测量结果的完整表述应包括估计值、测量值单位及测量不确定度。众所周知，没有测量单位的数据不能表征被测量的大小，没有测量不确定度的测量结果不能评定测量的质量，从而失去或削弱了测量结果的可用性和可比性。按照国际计量局 1980 年的建议，被测量 $x$ 的测量结果表示成

$$x=\bar{x}\pm u_x(\text{单位}) \tag{2-13}$$

式中，$x$ 为测量结果；$\bar{x}$ 为被测量的算术平均值；$u_x$ 为测量的不确定度。所以被测量的测量结果表示式由 3 部分组成，即被测量的算术平均值、不确定度和单位。

## 2.4 直接测量结果与不确定度的估算

### 2.4.1 单次直接测量的不确定度

在具体的实验中，有的测量只需测量一次。对于单次测量，其测量不确定度只能进行特殊的简化处理。在简化处理中，一般不考虑不确定度 A 类分量。所以单次测量的合成不确定度就是不确定度 B 类分量 $u_B$，即

$$u_x = u_B = \frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}} \tag{2-14}$$

### 2.4.2 多次直接测量的不确定度

假设对某直接测量物理量 $x$ 进行 $n$ 次重复测量，其不确定度的评定步骤一般如下：

(1) 修订测量数据中的可定系统误差，并进行测量数据的检验并剔除所有坏值；

(2) 计算测量的算术平均值 $\bar{x} = \dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n} x_i$ 作为测量结果的最佳值；

(3) 计算测量的 A 类不确定度 $u_A$，其中 $u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$；

(4) 分析测量的条件以及测量仪器的极限误差 $\Delta_{仪}$ 以及 B 类不确定度 $u_B$，其中 $u_B=\dfrac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}$；

(5) 计算合成不确定度 $u_x=\sqrt{u_A^2+u_B^2}$ 或扩展不确定度 $U_x=ku_x$ ($k=1,2,3$，对应的置信概率分别为 0.683、0.955 或 0.997)。

### 2.4.3 直接测量结果的表示方法

一个没有标明不确定度的测量结果是没有科学价值的。一个测量结果的完整和正确表示如下：

**1. 直接单次测量结果的表示**

测量结果的表示式为

$$x = \bar{x} \pm u_B\text{(单位)}$$

其中，$u_B=\dfrac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}$。

**2. 直接多次测量结果的表示**

测量结果的表示式为

$$x = \bar{x} \pm u_x\text{(单位)}$$

式中，$u_x = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$，$u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$，$u_B = \Delta_{仪} / \sqrt{3}$。

### 2.4.4　直接测量的数据处理举例

**例 2-1**　用螺旋测微计测小球的直径，5 次测量值分别为 5.499mm，5.500mm，5.499mm，5.498mm，5.498mm，求小球直径。

**解**：小球直径的算术平均值为

$$\bar{d} = \left(\sum_{i=1}^{5} d_i\right)\Big/5 = 5.500\text{mm}$$

不确定度 A 类分量为　$u_A = S(\bar{d}) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{5}(d_i - \bar{d})^2}{5(5-1)}} = 0.00037\text{mm}$

不确定度 B 类分量为　$u_B = \Delta_{仪}/\sqrt{3} = 0.004/\sqrt{3} = 0.0023(\text{mm})$

合成不确定度为　$u_d = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00037^2 + 0.0023^2} = 0.003(\text{mm})$

小球直径的测量结果为　$d = \bar{d} \pm u_d = (5.500 \pm 0.003)\text{mm}$

**例 2-2**　用 $\Delta_{仪} = 0.01\text{g}$ 的天平称量某物的质量，共称 5 次，数据如下（单位：g）：57.161，257.164，57.168，57.165，57.165，写出结果表达式。

**解**：质量的算术平均值为

$$\bar{m} = \left(\sum_{i=1}^{5} m_i\right)\Big/5 = 57.1646\text{g}$$

不确定度 A 类分量为　$u_A = S(\bar{m}) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{5}(m_i - \bar{m})^2}{5(5-1)}} = 0.00224\text{g}$

不确定度 B 类分量为　$u_B = \Delta_{仪}/\sqrt{3} = 0.01/\sqrt{3} = 0.00577(\text{mm})$

合成不确定度为　$u_m = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00224^2 + 0.00577^2} = 0.007(\text{g})$

小球直径的测量结果为　$m = \bar{m} \pm u_m = (57.165 \pm 0.007)\text{g}$

## 2.5　间接测量结果与不确定度的估算

在很多实验中，我们进行的测量都是间接测量。间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的解析式计算出来的。这样一来，直接测量结果的不确定度就必然影响到间接测量结果，这种影响的大小也可以由相应的解析式计算出来。即间接测量的算术平均值与合成不确定度由直接测量结果通过函数式计算得出。

### 2.5.1　间接测量的最佳值

设间接测量所用的函数式为

$$N = F(x, y, z, \cdots)$$

其中，$N$ 是间接测量的结果，$x, y, z$ 是直接测量的结果，它们是相互独立的量。若按照直接测量量数据处理程序，求出各直接测量量的结果如下：

$$x = \bar{x} \pm u_x,\quad y = \bar{y} = \pm u_y,\quad z = \bar{z} \pm u_z, \cdots$$

将各直接测量的最佳估计值代入函数关系式中，可求得**间接测量的最佳值**，即把各参量中的最佳值 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots$ 代入函数中，便得到**间接测量量 $N$ 的算术平均值为**

$$\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots) \tag{2-15}$$

### 2.5.2　间接测量的不确定度

考虑到不确定度合成的统计性质，在大学物理实验中，一般采用方和根合成来估计间接测量结果的标准偏差不确定度，所以间接测量量 $N$ 的合成不确定度为

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \cdots} \tag{2-16}$$

间接测量量的相对不确定度为

$$E_N = \frac{u_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \cdots} \tag{2-17}$$

若间接测量量的函数式以和差运算为主，则先计算不确定度 $u_N$ 比较方便，详见例 2-3；若以乘除运算为主，则先计算相对不确定度 $E_N$ 比较方便，如例 2-4 所示。

**例 2-3**　已知 $N=x+y-z$ 为和差关系，且各直接测量量相互独立，其结果为：$x=\bar{x}\pm u_x, y=\bar{y}\pm u_y, z=\bar{z}\pm u_z$。

**解**：$N$ 的算术平均值为

$$\bar{N} = \bar{x} + \bar{y} - \bar{z}$$

合成不确定度为

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right)^2 u_z^2}$$

因为

$$\frac{\partial N}{\partial x} = 1,\quad \frac{\partial N}{\partial y} = 1,\quad \frac{\partial N}{\partial z} = -1$$

所以

$$u_N = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$$

相对不确定度为

$$E_N = u_N / \bar{N}$$

**例 2-4**　已知 $N=x\cdot y/z$ 为乘除关系，已知各直接测量量相互独立，且其各自的结果为：$x=\bar{x}\pm u_x, y=\bar{y}\pm u_y, z=\bar{z}\pm u_z$。

**解**：算术平均值为 $\bar{N}=\bar{x}\cdot\bar{y}/\bar{z}$，相对不确定度由式(2-17)得

$$E_N = \frac{u_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \cdots}$$

具体计算过程如下：

对 $N=x\cdot y/z$ 两边取对数，得

$$\ln N=\ln x+\ln y-\ln z$$

将 $\ln N$ 分别对 $x,y,z$ 求偏导数，可得

$$\frac{\partial \ln N}{\partial x}=\frac{1}{x},\quad \frac{\partial \ln N}{\partial y}=\frac{1}{y},\quad \frac{\partial \ln N}{\partial z}=-\frac{1}{z}$$

则相对不确定度为

$$E_N=\sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial x}\right)^2u_x^2+\left(\frac{\partial \ln N}{\partial y}\right)^2u_y^2+\left(\frac{\partial \ln N}{\partial z}\right)^2u_z^2}=\sqrt{[u_x/\bar{x}]^2+[u_y/\bar{y}]^2+[u_z/\bar{z}]^2}$$

合成不确定度为

$$u_N=\bar{N}\cdot E_N$$

附：常用函数的不确定度 $u_N$ 传递公式见表 2-2。

**表 2-2　常用函数的不确定度传递公式**

| 函数式 | 不确定度传递公式 |
|---|---|
| $N=x+y$ | $u_N=\sqrt{u_x^2+u_y^2}$ |
| $N=x-y$ | $u_N=\sqrt{u_x^2+u_y^2}$ |
| $N=ax+by+cz$ | $u_N=\sqrt{au_x^2+bu_y^2+c^2u_z^2}$ |
| $N=xy$ | $u_N/N=\sqrt{(u_x/x)^2+(u_y/y)^2}$ |
| $N=x/y$ | $u_N/N=\sqrt{(u_x/x)^2+(u_y/y)^2}$ |
| $N=x^ay^bz^{-c}$ | $u_N/N=\sqrt{a^2(u_x/x)^2+b^2(u_y/y)^2+c^2(u_z/z)^2}$ |
| $N=\sin x$ | $u_N=\lvert\cos x\rvert u_x$ |
| $N=\ln x$ | $u_N=u_x/x$ |

在应用不确定度传递公式估算间接测量量的不确定度时应注意：如果间接测量量中的某几个直接测量量是单次测量，那么直接用单次测量的结果及不确定度代入不确定度传递公式。

### 2.5.3　间接测量的结果表达式

间接测量结果的完整表示与直接测量类似，写成以下形式：

$$N=\bar{N}\pm u_N(\text{单位})\tag{2-18}$$

式中，$\bar{N}$ 是间接测量量的最佳值。

### 2.5.4　间接测量的数据处理举例

**例 2-5**　用螺旋测微计测圆柱体的体积，已知其直径的算术平均值 $\bar{d}=1.008\text{cm}$，$d$ 的不确定度为 $u_d=5.88\times10^{-4}\text{cm}$，圆柱体高度的算术平均值为 $\bar{h}=1.0110\text{cm}$，$h$ 的不确定度为 $u_h=3.47\times10^{-4}\text{cm}$，求圆柱体的体积。

**解**：圆柱体的体积 $V=\frac{1}{4}\pi d^2 h$，为乘除关系，则应先计算相对不确定度。

算术平均值为

$$\bar{V}=\frac{1}{4}\pi\bar{d}^2\bar{h}=0.8064\text{cm}^3$$

对 $V=\frac{1}{4}\pi d^2 h$ 两边取对数，可得

$$\ln V=\ln\frac{\pi}{4}+2\ln d+\ln h$$

则

$$\frac{\partial\ln V}{\partial d}=\frac{2}{d},\quad\frac{\partial\ln V}{\partial h}=\frac{1}{h}$$

相对不确定度为

$$E_V=\sqrt{\left(\frac{\partial\ln N}{\partial d}\right)^2u_d^2+\left(\frac{\partial\ln N}{\partial h}\right)^2u_h^2}=\sqrt{\left(\frac{2}{d}\right)^2u_d^2+\left(\frac{1}{h}\right)^2u_h^2}=0.12\%$$

则合成不确定度为

$$u_V=E_V\cdot\bar{V}=0.8064\times0.12\%=0.001(\text{cm}^3)$$

圆柱体体积的测量结果为

$$V=\bar{V}\pm u_V=(0.806\pm0.001)\text{cm}^3$$

## 2.6 有效数字及其运算法则

任何物理量的测量都存在误差，所以表示测量结果的数值位数不能任意取位，应该能正确地反映测量的准确程度。由于数值计算都有一定的近似性，这就要求计算的准确性既不超过测量的准确性，但也不能使测量的准确性受到损害；计算的准确性与测量的准确性必须相适应。

### 2.6.1 有效数字的基本概念

**有效数字(significant figure)**的定义：能正确有效地表示测量和实验结果的数字，称为有效数字。

有效数字由可靠的几位数字加上一位可疑数字组成，即由仪器最小分度以上的若干位的准确数值(可靠数字)与最小分度的下一位估读数值(可疑数字)构成。有效数字的最后一位虽然是可疑的、有误差的，但在一定程度上反映了客观实际，因此是有效的。

例如用毫米尺测量物体长度。如图 2-2 所示，读出的数值为 3.59cm，其中前两位 3.5cm 是由尺上准确读出的，是可靠数字，最后一位 0.09cm 是在最小分度间估计出的，存在有误差，因此是可疑数字。

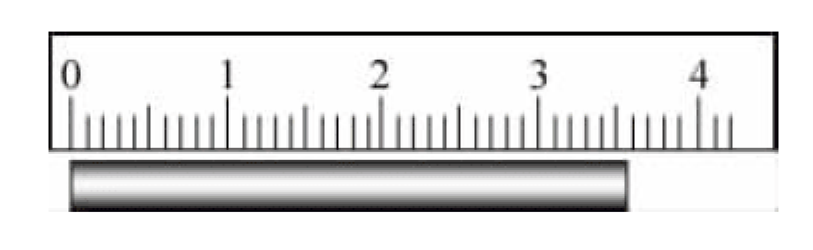



图 2-2 长度的测量

使用有效数字应注意的问题：

(1) 在非零数字当中和数字后面的“0”都是有效数字，数字前的“0”不是有效数字。

有效数字当中和数字后面的“0”都是有效数字，但数字前面的“0”不计为有效数字。如，0.026010 是 5 位有效数字；20.0401 为 6 位有效数字。若把 73.0mm 换算成 0.0730m，也还是三位有效数字。即在第一位非零数字之前的“0”不是有效数字。

（2）有效数字的位数与小数点及单位换算无关。

如 $1.20\text{m}=1.20\times10^3\text{mm}=1.20\times10^{-3}\text{km}$，仍为 3 位有效数字；例如，把 1.0km 换算成米为单位，就不能写成 1000m，因为这样就变成了 4 位有效数字，虽然数值大小相等，但有效数字位数不一样，反映的测量精度也不同了，应写成 $1.0\times10^3\text{m}$。

（3）有效数字的科学表示法。为了方便测量结果的表达，特别是书写较大或较小的数字时通常用 10 的方幂来表示其数量级，即写成 $\times10^{\pm n}$ 的标准形式（$n$ 为正整数）。用这种方法计数值时，常在小数点前取一位数字。例如 0.0678cm，写成标准形式为 $6.78\times10^{-2}\text{cm}$。

## 2.6.2　测量结果有效数字的确定法则

### 1. 有效数字尾数的取舍法则

过去对有效数字的尾数采用“4 舍 5 入”的规则来修约，但是这样处理“入”的机会总是大于“舍”的机会，不甚合理。为了弥补这一缺陷，目前有效数字尾数的取舍法则普遍采用**“四舍六入五凑偶”**。即尾数小于 5 则舍，大于 5 则入，等于 5 时，若前一位是偶数则舍，前一位是奇数则入。

例如，4.8554 取 4 位有效数字时为 4.855；取 3 位有效数字时为 4.86；取 2 位有效数字时为 4.8；再如 45.365354 在取 3 位、4 位、5 位和 6 位有效数字时的结果分别为：45.4，45.36，45.365，45.3654。

### 2. 不确定度的有效数字保留方法

作为最后测量结果的不确定度一般只保留一位有效数字，不确定度的取舍法则是**“只进不舍”**（非零即进）。如 $u_x=0.41\text{cm}$，应保留为 $u_x=0.5\text{cm}$。

### 3. 测量结果中的有效数字

最后的测量结果只能保留一位可疑数字，不确定度只保留一位有效数字。因此，被测量的算术平均值末位数的位置由不确定度决定。根据不确定度的大小可以判断表示测量结果的数字中可疑数字的位置。例如，$I=(38.2\pm0.3)\text{mA}$ 是正确的，而 $m=(320.15\pm0.6)\text{g}$，不确定度为 0.6，表达式中 3、2、0 是可靠的，“1”开始是可疑的，式中多了一个可疑数字“5”，所以表达式中的有效数字是错的，应改写成 $m=(320.2\pm0.6)\text{g}$。又如 $F=(12.80\pm0.002)\text{N}$，不确定度为 0.002，表达式 12.80 中 1、2、8、0 都是可靠数字，所以表达式中少了一个可疑数字，所以该表达式是错误的，应该改成 $F=(12.800\pm0.002)\text{N}$。而表达式 $L=(28.32\pm0.024)\text{mm}$，不确定度为 0.024，显然是错的，前面讲到不确定保留一位有效数字，取舍法则是非零则进，所以应该把 0.024 改成 0.03，再来判断平均值的末尾取舍，所以改成 $L=(28.32\pm0.03)\text{mm}$。总之，用不确定度来确定有效数字个数，是判断一切测量结果有效数字问题的最好办法。

### 2.6.3 有效数字的运算法则

物理实验中的测量大多是间接测量，因此需要经过一系列函数的运算才能得到最后的测量结果。计算结果也应该用有效数字表示，所得结果也只有保留一位可疑数字。其运算过程依照下列定则来判断数字性质。

① 可靠数字与可靠数字运算，结果为可靠数字。

② 可疑数字与可靠数字(或可疑数字)运算，结果为可疑数字。

以下根据定则给出四则运算中运算结果有效数字的确定方法：

**1. 加减法**

诸数相加减时，所得结果的有效数字的位数按最高可疑位保留。

**例 2-6** $12.3\dot{4}+2.357\dot{4}=14.7\dot{0}$

**例 2-7** $26.2\dot{5}-3.925\dot{7}=22.3\dot{2}$

**2. 乘除法**

两数相乘除时，所得结果有效数字的位数按最少的保留。

**例 2-8** $3.52\dot{3}\times18.\dot{6}=65.\dot{5}$

但两数相乘时，若两数最高位的积大于或等于10时，则积的有效数字多保留一位。

**例 2-9** $8.3\dot{2}\times43.2\dot{6}=359.\dot{9}$

**例 2-10** $4.525\dot{4}\div5.4\dot{7}=0.82\dot{7}$

**注意**：两数相除时，若被除数有效数字的位数小于或等于除数有效数字的位数，且其最高位的数小于除数最高位的数，则商的有效数字应比被除数少一位。

**例 2-11** $12\dot{7}\div36\dot{1}=0.3\dot{5}$

**3. 乘方与开方**

乘方按乘法法则，开方所得结果有效数字的位数一般与底数的有效数字位数相同。

如：$2.8^2=7.8$，$4.256^2=18.114$，$\sqrt{54.39}=7.375$

**4. 函数运算**

1）对数

所得结果中尾数有效数字的位数与真数的位数相同。

如：$\lg56.7=1.754$，$\ln82.6=4.414$

2）指数

所得结果有效数字的位数与指数小数点后的位数相同。

如：$10^{6.25}=1.8\times10^6$，$e^{0.0000924}=1.000092$

3）三角函数

所得结果有效数字的位数由角度决定。当角度精确到$0.1^\circ$或$1'$时，取四位有效数字；当角度精确到$1''$时，取五位有效数字；如：$\cos7.26^\circ=0.9920$，$\cos9^\circ24'=0.9866$。

**5. 常数有效数字的位数**

$\pi$，e，$\sqrt{5}$，1/3…常数的有效数字的位数根据具体问题适当选取，一般比测量值多保留

一位。

以上这些结论，在一般情况下是成立的，有时会有一位的出入。为了防止数字取舍后运算引入新误差，在中间过程，参与运算的数据可多取一位有效数字。合成不确定度时也可按此原则处理，最后得到的总不确定度按不确定度的取位规则来确定。必须指出，测量结果的有效数字位数取决于测量，而不取决于运算过程。

## 2.7　实验数据处理的基本方法

由实验测得的数据，必须经过科学的分析和处理，才能找出各个物理量之间的变化关系及其服从的物理规律。我们把从获得原始数据起到得到结论为止的加工过程称为数据处理。

常用的实验数据处理方法主要有列表法、作图法、逐差法、最小二乘法（不要求掌握）等。

**1. 列表法（tabulation method）**

列表法是记录和处理实验数据的基本方法，也是其他实验数据处理方法的基础。列表法可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系，即有助于及时发现和检查实验中存在的问题，判断测量结果的合理性；同时也有助于分析结果，找出有关物理量之间存在的关系，为作图奠定了基础。

数据在列表处理时，应注意以下事项：

① 表的上方应有表头标题，写明所列表格的名称。

② 表格力求简单明了，便于看出有关物理量之间的关系。

③ 表格中应标明所记录的物理量的名称和单位。单位写在标题栏中，一般不重复地记在各个数字上。

④ 表中的数据要正确地反映测量结果的有效数字。

⑤ 表中除列入原始测量数据外，根据需要处理过程的一些重要的中间结果也可列入表中。

**2. 作图法（graphing method）**

作图法可把一系列数据之间的关系或其变化情况用图线直观地表示出来。作图法是研究物理量之间的变化规律，找出对应的函数关系，求出经验公式的最常用方法之一。作图法有多次测量取平均的效果，并易于发现测量中的错误，还可以把复杂的函数关系简化。

1）图示法（graphic method）

利用实验数据，将实验中物理量之间的函数关系用几何图线表示出来，这种方法称为**图示法**。图示法简明直观，易显示数据的极值点、转折点、周期性等。也可以从图线中求出某些实验结果，如直接读出没有进行观测的对应于某 $x$ 和 $y$ 值（称为内插法）。在一定条件下，还可以从图线的延伸部分读到测量数据范围以外的点（称为外推法）。

图示法应注意以下作图规则：

（1）选坐标纸。作图需要合适的坐标纸，最常用的是直角坐标纸。其大小应根据测量范围、有效数字和结果需要来定。原则上数据中的可靠数字在图中是可靠的，可疑的一位在图中应是估计的。

(2) 标明坐标轴。一般以横轴代表自变量,纵轴代表因变量,用粗细适当的线画出坐标轴及方向,并在末端近旁标明所代表的物理量及单位。

(3) 定标尺。定标尺是确定坐标轴的起点读数以及每一小格表示的数值,要合理的布局和充分利用坐标纸,坐标的起点不一定从变量的"0"开始,横轴和纵轴的标度也可以不同。要尽量使图线比较对称地充满整个图纸,避免使图偏于一角或一边。标度数值的位数应与实验数据的有效数字位数一致。为便于读数和描点,选定比例时,应使最小分格代表"1""2""5""10"等,而不要用"3""6""7""9"。另外根据每一小格的值在轴上每隔一定距离的位置标上对应的数值。

(4) 描点。根据测量数据,用适当的符号如"○""□""△""+""×"等,在坐标纸上清楚地描绘出对应的数据点。一张图要画几条曲线时,不同曲线需用不同的符号。

(5) 连线。应当根据数据点的分布特征用直尺或曲线板等把点连接成光滑的线,由于测量误差的必然性,所以曲线不一定要通过所有的点,而应该尽可能地接近大多数的测量点,并使测量点大致均匀地分布在曲线的两边。个别偏离过大的点应该舍弃,并重新测量校对。

(6) 图注。在图纸的明显处写出图线的名称,作者姓名、日期。

2) 图解法(graphical method)

根据已经作好的图线,应用解析的方法,求出对应的函数和有关参量,这种方法称为**图解法**。当实验图线是直线时,采用此法就更为方便。

(1) 求直线的斜率和截距

在实验数据范围内,在尽量靠近直线的两端处任取两点 $A(x_1,y_1)$ 和 $B(x_2,y_2)$,其 $x$ 的坐标最好为整数,并注意不要取原始实验数据点。用与实验数据点不同的符号将它们标示出来,并在旁边注明其坐标读数,如图 2-3 所示。为了减少误差,$A$,$B$ 两点的距离应尽量选得远一些。设图线的直线方程为 $y=kx+b$,将 $A$,$B$ 两点的坐标值代入直线方程,得到斜率

$$a=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1} \tag{2-19}$$

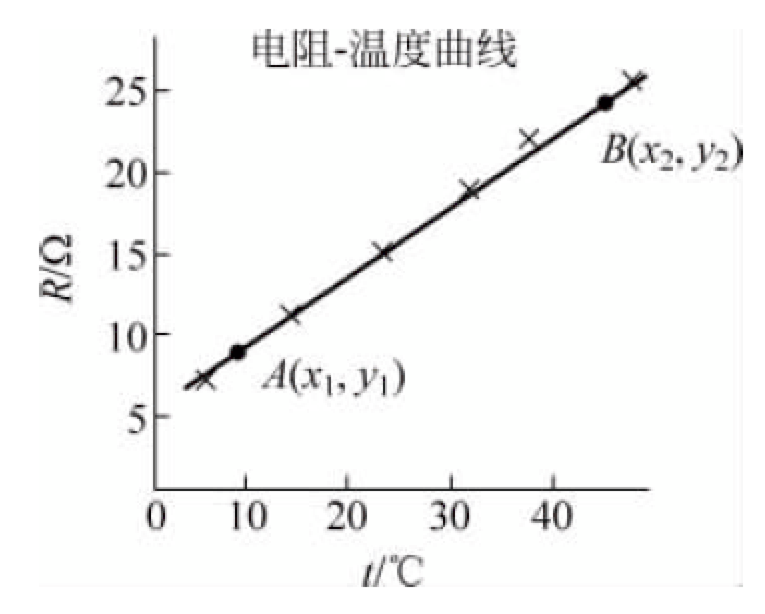



图 2-3 求直线的斜率和截距示意图

直线的截距为

$$b=\frac{x_2y_1-x_1y_2}{x_2-x_1} \tag{2-20}$$

(2) 曲线改直线

由于在许多实际问题中,物理量之间的关系不是线性关系,但是可以通过适当的变换,使它们成为线性关系,即把曲线改成为直线。举例如下:

① 将函数 $y=ax^b$(其中 $a$,$b$ 为常量)两边取对数得 $\lg y=b\lg x+\lg a$,则 $\lg y$-$\lg x$ 图是直线,斜率为 $b$,截距为 $\lg a$。

② 将函数 $y=a\mathrm{e}^{-bx}$(其中 $a$,$b$ 为常量)两边取自然对数得 $\ln y=\ln a-bx$,则 $\ln y$-$x$ 图示直线,斜率为 $-b$,截距为 $\ln a$。

除此之外,还有很多函数形式,如 $y^2=2px$($p$ 为常量),$y=\dfrac{x}{a+bx}$(其中 $a$,$b$ 为常量)等

经过适当变换，均可得到相应的线性关系。方便我们对实验数据的处理，也容易得到有关参数。

**3. 逐差法(method of successive difference)**

逐差法是数据处理中的一种常用方法，特别是在被测变量之间存在多项式函数关系，自变量等间距变化的实验中，更加具有独特的优点。本课程中有多个实验要用到逐差法。

1）逐差法的适用条件：

（1）自变量 $x$ 是等间距变化；

（2）被测量 $x, y$ 之间的关系可表达为多项式，即

$$y = a_0 + a_1 x$$
$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$
$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$
$$\vdots$$

2）应用方法

将等间距测量的 $n$(为偶数)个数据($x_1, x_2, \cdots, x_n$)分成前后两组，每组$\frac{n}{2}$项，即

$$(x_1, x_2, \cdots, x_{n/2}) \quad 和 \quad (x_{n/2+1}, x_{n/2+2}, \cdots, x_n)$$

然后对应项相减得出逐差量，即

$$\Delta x_i = (x_{n/2+i} - x_i), \quad 其中 \quad i = 1, 2, \cdots, n/2$$

则逐差量的算术平均值为

$$\overline{\Delta x_{逐}} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |\Delta x_i|}{n/2}$$

则$\overline{\Delta x}$的值为

$$\overline{\Delta x} = \frac{\overline{\Delta x_{逐}}}{n/2} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |\Delta x_i|}{(n/2)^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |(x_{n/2+i} - x_i)|}{(n/2)^2} = \frac{\left|\sum_{i=n/2}^{n} x_i - \sum_{i=1}^{n/2} x_i\right|}{(n/2)^2}$$

**例 2-12**　用受力拉伸法测弹簧的弹性系数 $k$。已知弹性限度内伸长量 $x$ 与拉力 $F$ 满足 $F=kx$ 关系。现等间距地改变拉力 $\Delta F$，测得一组数据见表 2-3。

**表 2-3　弹簧受力伸长的测量数据**

| 次数 | 拉力 $F/(10^{-3}\text{N})$ | 伸长 $x/(10^{-2}\text{m})$ |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 0.00 |
| 2 | 2×9.8 | 1.50 |
| 3 | 4×9.8 | 3.02 |
| 4 | 6×9.8 | 4.50 |
| 5 | 8×9.8 | 6.01 |
| 6 | 10×9.8 | 7.50 |
| 7 | 12×9.8 | 9.00 |
| 8 | 14×9.8 | 10.50 |

(1) 验证 $\Delta x$ 与 $\Delta F$ 的线性关系

按 $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ 逐项相减分别得出 1.50,1.52,1.48,1.51,1.49,1.50,1.50($10^{-2}$m)。可判断出 $\Delta x_i$ 基本相等,$\Delta x$ 与 $\Delta F$ 为线性关系。

(2) 用逐差法求弹簧的弹性系数 $k$

将实验数据分成前组($x_1, x_2, x_3, x_4$)和后组($x_5, x_6, x_7, x_8$),对应项相减后求平均值,可得

$$\overline{\Delta x} = \frac{(x_8 - x_4) + (x_7 - x_3) + (x_6 - x_2) + (x_5 - x_1)}{(8/2)^2}$$
$$= \frac{(10.50 - 4.50) + (9.00 - 3.02) + (7.50 - 1.50) + (6.01 - 0.00)}{16}$$
$$= 1.50 \times 10^{-2}(\mathrm{m})$$

由于每隔 1 个数据的拉力为 $\Delta F = 2 \times 9.8(10^{-3}\mathrm{N})$,则得

$$k = \frac{\Delta F}{\overline{\Delta x}} = \frac{2 \times 9.8 \times 10^{-3}}{1.5 \times 10^{-2}} = 1.31(\mathrm{N \cdot m^{-1}})$$

## 2.8 实验报告书写样板

科技实验报告是描述、记录某项科研课题实验的过程和结果的报告,具有纪实的特征。它是科技报告中应用范围广泛的一种报告形式。科学实验报告主要是科学工作者撰写的实验报告,要求有所发现,有所发明,有所创造,不是简单重复和再现别人的成果。这种复杂而新颖的实验报告,内容丰富,需要谋篇成文,有时就是以"报告"实验全过程为主的科技论文,具有文献价值。

实验报告种类繁多,尽管各类实验报告从内容上看千差万别,但是从写作的角度来看,所有实验报告是否合格,却存在着共同标准原则,即:正确性(accuracy)、客观性(objectivity)、公正性(impartiality)、确证性(verifiability)、可读性(readability)。

科技实验报告主要包含以下主要内容,即实验名称、实验目的、实验原理及实验方法、实验器材、实验步骤、实验条件、实验数据及处理、误差分析与不确定度评定、实验结果或结论、讨论。科技报告内容组成并非千篇一律,不同学科的实验其报告也有所差异,以下举一个实例来介绍物理实验报告的格式和书写规范。

**范例 1**

**形状规则的固体密度的测量**

**一、实验目的**

1. 了解游标卡尺的原理和构造及其使用方法;
2. 了解螺旋测微器的原理和构造及其使用方法;
3. 了解物理天平的原理与构造及其使用方法;
4. 学习形状规则物体的密度测量方法。

**二、实验原理及方法**

物体密度定义为物体的质量除以物体的体积,即

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1}$$

式中 $\rho$ 为物体的密度，$m$ 为物体的质量，$V$ 为物体的体积。

对于需要测定密度的物体，可以把它做成形状规则样品（如球体、柱体、方体等形状），形状规则的物体在数学上都有对应的体积计算公式，所以只要采用长度测量的仪器测出物体的几何尺寸便可确定它的体积。对于形状为圆柱体的物体，其密度计算公式为

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h} \tag{2}$$

式中 $m$ 为物体的质量，$d$ 为铁圆柱体的直径，$h$ 为铁柱的高。实验时用物理天平测量物体质量，考虑到物理天平两臂可能存在偏差，测量时采用互易测量法来测量铁圆柱体的质量。测量时先把待测样品放在左盘，右盘放砝码，测出质量 $m_1$；然后把样品放在右盘，左盘放砝码再测出其质量 $m_2$。容易证明质量的测量结果可由式(3)确定

$$m = \sqrt{m_1 m_2} \tag{3}$$

把式(3)代入式(2)得

$$\rho = \frac{4\sqrt{m_1 m_2}}{\pi d^2 h} \tag{4}$$

至于圆柱体的直径和高的测量，可用螺旋测微器和游标卡尺来测量。

## 三、实验器材

铁圆柱体，螺旋测微器，游标卡尺，物理天平

## 四、实验步骤

1. 用螺旋测微器来重复测量圆柱体的直径（注意：重复测量时考虑了圆柱体机械加工可能存在不够圆的因素，重复测量时应取不同位置测量）。

2. 用游标卡尺重复测量圆柱体的高度。

3. 铁圆柱体质量的测量。首先进行天平的水平调节，再进行天平的平衡调节。调节完毕后才能进行质量测量，最后互易测量质量。并正确记录数据在原始表格，如表 2-4 所示。

## 五、实验数据及处理

**表 2-4　铁圆柱体的质量、直径和高的测量数据**

| $m_1$/g | $m_2$/g | $d$/mm | $h$/mm |
|---|---|---|---|
| 77.46 | 77.52 | 19.880 | 31.76 |
| | | 19.882 | 31.74 |
| | | 20.880 | 31.72 |
| | | 19.878 | 31.76 |
| | | 19.876 | 32.74 |
| | | 19.881 | 31.76 |
| | | 19.883 | 31.78 |
| | | 19.879 | 31.74 |
| | | 19.880 | 31.76 |
| | | 19.881 | 31.74 |

从表 2-4 中数据 $d$、$h$ 采用肖维涅法（详见附录 1）检查，查得直径测量第 3 组 20.880mm 和高度测量第 5 组数据 32.74mm 为坏值并剔除，对余下数据继续检查，无坏值。所以铁圆柱体的质量、直径、高度测量的最佳估计值和不确定度分别如下：

1. 铁圆柱体的质量测量值和不确定度分别为

$$m = \sqrt{m_1 m_2} = 77.49(\mathrm{g})$$

$$u_{m_1} = u_{m_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029(\mathrm{g})$$

2. 铁圆柱体的直径测量平均值及其不确定度分别为

$$\bar{d} = 19.880\mathrm{mm},\quad \Delta_{仪} = 0.004\mathrm{mm},\quad n = 9$$

$$u_A = S(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} = 0.00071\mathrm{mm}$$

$$u_B = \Delta_{仪} / \sqrt{3} = 0.004/\sqrt{3} = 0.0023(\mathrm{mm})$$

$$u_d = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00071^2 + 0.0023^2} = 0.0024(\mathrm{mm})$$

3. 铁圆柱体的高度测量平均值及其不确定度分别为

$$\bar{h} = 31.75\mathrm{mm},\quad \Delta_{仪} = 0.02\mathrm{mm},\quad n = 9$$

$$u_A = S(\bar{h}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})^2}{n(n-1)}} = 0.0059\mathrm{mm}$$

$$u_B = \Delta_{仪} / \sqrt{3} = 0.02/\sqrt{3} = 0.0115(\mathrm{mm})$$

$$u_h = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0059^2 + 0.0115^2} = 0.013(\mathrm{mm})$$

4. 铁圆柱体的密度测量平均值及其不确定度分别为

$$\bar{\rho} = \frac{4\sqrt{m_1 m_2}}{\pi \bar{d}^2 \bar{h}} = \frac{4 \times 77.49}{3.14 \times (19.880)^2 \times 31.75}$$

$$= 7.867 \times 10^{-3}(\mathrm{g \cdot mm^{-3}}) = 7.867(\mathrm{g \cdot cm^{-3}})$$

$$E_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_1}\right)^2 u_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_2}\right)^2 u_{m_2}^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial h}\right)^2 u_h^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{2m_1}\right)^2 u_{m_1}^2 + \left(\frac{1}{2m_2}\right)^2 u_{m_2}^2 + \left(\frac{2}{d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2 u_h^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.029}{2 \times 77.46}\right)^2 + \left(\frac{0.029}{2 \times 77.52}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.0024}{19.880}\right)^2 + \left(\frac{0.013}{31.75}\right)^2}$$

$$= 0.00054$$

$$u_\rho = E_\rho \cdot \bar{\rho} = 0.00054 \times 7.867 = 0.0043(\mathrm{g \cdot cm^{-3}})$$

## 六、实验结果

铁圆柱体的直径 $d$：$d = \bar{d} \pm u_d = 19.880 \pm 0.003(\mathrm{mm})$

铁圆柱体的高度 $h$：$h = \bar{h} \pm u_h = 31.75 \pm 0.02(\mathrm{mm})$

铁圆柱体的密度 $\rho$：$\rho = \bar{\rho} \pm u_\rho = 7.867 \pm 0.005(\mathrm{g \cdot cm^{-3}})$

**七、讨论**

对于形状规则的物体，密度测量采用此方法会比较简单，但是要求样品的制作和加工精确度要好，测量工具的精确度也要求要精确。毕竟要作精确的加工还是存在一定的困难。所以有必要研究出测量形状不规则的物体的密度测量方法，比较有实际应用意义。



## 习题

1. 用游标卡尺测量时由于下面原因产生误差，请说明误差的种类。

(1) 环境温度引起的热胀冷缩；

(2) 视差；

(3) 本身刻度不均匀；

(4) 零点不准。

2. 指出下列各量有效数字的位数：

(1) 4.20g；　(2) $3.00\times10^{-2}$ms；　(3) 0.005mA；(4) 16.04mm。

3. 判断下列结果对错，并改正错误。

(1) $d=(10.45\pm0.01)$cm；

(2) $I=(4.6\pm0.03)$mA；

(3) $l=(13.85\pm0.24)$mm。

4. 用单摆测量重力加速度，可应用式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 测出 $g$，式中 $l$ 为摆长，$T$ 为周期。已知 $l=(97.69\pm0.02)$cm，$T=(1.9842\pm0.0002)$s，求重力加速度 $g$。

## 附录 1

### 实验数据检验与坏值的剔除方法

在大量的测量数据中，有时可能会混有过大或过小的“可疑值”；“可疑值”的存在可能会影响测量结果，这些“可疑值”可能是坏值，应剔除。另外，当一组正确测量值的分散性较大时，出现个别偏差较大的数据，尽管概率很小，但也是有可能的。如果人为地将这些正常值也一起剔除，也是不合理的。因此要有一个合理的判断标准，下面介绍两种常用的准则。

**1. 拉依达准则**

假设对被测量进行等精度测量，得到一组数据 $x_1,x_2,\cdots,x_n$。算出这组数据的算术平均值为$\bar{x}$及偏差(也叫残差)$v_i=x_i-\bar{x}(i=1,2,\cdots,n)$，并按照贝塞尔公式算出标准偏差 $S$，若某个测量值 $x_b$ 的偏差 $v_b(1\leqslant b\leqslant n)$，满足$|v_b|=|x_b-\bar{x}|>3S$，则认为 $x_b$ 是含有粗大误差值的坏值，应予剔除。对剔除后的测量列，应再次重复进行上述步骤，直到没有坏值为止。应当指出，拉依达准则只有在测量次数 $n$ 较大时才适用。

**2. 肖维涅准则**

设重复测量的次数为 $n$，任一次测量值的标准偏差为 $S$，肖维涅准则认为凡是测量值 $x_i$ $(i=1,2,\cdots,n)$满足$|x_i-\bar{x}|>c_nS$，则认为 $x_i$ 是坏值，应剔除。式中 $c_n$ 称为肖维涅系数，其值与测量次数 $n$ 有关，表 2-5 给出了各种测量次数对应的 $c_n$ 值。可见，测量次数越多，$c_n$ 值就越大；当 $n>100$ 时，$c_n$ 值接近于 3，和依拉达准则相当。但当 $n\leqslant 4$ 时，准则无效，所以表中的系数 $n$ 从 5 开始。

值得注意的是，按以上准则判别时，若测量数据中存在两个以上测量值需要剔除，只能先剔除偏差最大的测量值，然后再重新计算平均值$\bar{x}$及标准偏差 $S$，再对余下的测量值进行判断，直至所有的测量值均不是坏值为止。

表 2-5　肖维涅系数表

| $n$ | $c_n$ | $n$ | $c_n$ | $n$ | $c_n$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 1.65 | 14 | 2.10 | 23 | 2.30 |
| 6 | 1.73 | 15 | 2.13 | 24 | 2.31 |
| 7 | 1.80 | 16 | 2.15 | 25 | 2.33 |
| 8 | 1.86 | 17 | 2.17 | 30 | 2.39 |
| 9 | 1.92 | 18 | 2.20 | 40 | 2.49 |
| 10 | 1.96 | 19 | 2.22 | 50 | 2.58 |
| 11 | 2.00 | 20 | 2.24 | 75 | 2.71 |
| 12 | 2.03 | 21 | 2.26 | 100 | 2.81 |
| 13 | 2.07 | 22 | 2.28 | 200 | 3.02 |

# 第3章

# 基础性实验

## 实验一　固体密度的测量

本实验是物理实验中的基础实验，实验中介绍了游标卡尺、螺旋测微器和物理天平3种常用测量仪器的测量方法、使用技巧、注意事项以及对今后应用的帮助，说明了密度测量在物理实验课中的重要性。

### 一、实验目的(experimental purpose)

1. 掌握物理天平、游标卡尺、螺旋测微器的基本原理及使用方法；
2. 学会测量质量均匀分布且形状规则的固态物体密度的方法；
3. 学会正确由仪器上读取和记录数据，初步掌握直接测量和间接测量不确定度的计算法则以及正确处理实验数据和表达测量结果。

### 二、实验原理(experimental principle)

设物体的质量为 $m$，体积为 $V$，则物体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{3-1-1}$$

密度的单位为千克/立方米，符号是 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$。物体的密度与物体的状态有关，同样的物质气态、液态、固态的密度各不相同，同时与温度也有关系。若已知待测物体是一直径为 $D$，高度为 $h$ 的规则圆柱体，那么其体积为 $\frac{1}{4}\pi D^2 h$，密度为

$$\rho = \frac{4m}{\pi D^2 h} \tag{3-1-2}$$

则实验中只需测出圆柱体的质量 $m$、外径 $D$ 及高 $h$，代入式(3-1-2)便可计算出圆柱体的密度 $\rho$。

## 三、实验仪器(experimental device)

### 1. 待测金属圆柱体

### 2. 物理天平(physical balance)

天平是一种等臂杠杆,用来测量质量的仪器,常用的有物理天平、药物天平和分析天平,其中分析天平的精度最高,物理天平的精度最低。物理天平的外形和构造如图 3-1-1 所示。天平的横梁上有 3 个刀口,中刀放在支柱顶端的中刀承上,左右两边的刀口(又叫边刀)用来悬挂秤盘。横梁下面固定一个指针,当横梁摆动时,指针尖端会在分度盘前来回摆动。分度盘下方有一个制动旋钮,可使横梁上升或下降;横梁下降时,制动架会把它托住,以免磨损刀口。横梁两端有两个平衡螺母用于天平空载时调整平衡。横梁上装有游码,用于 1g 以下的称量。天平底座下的调平螺钉和支柱上的重锤(有些仪器是底座上装有水准气泡)用于调节天平底座的水平。

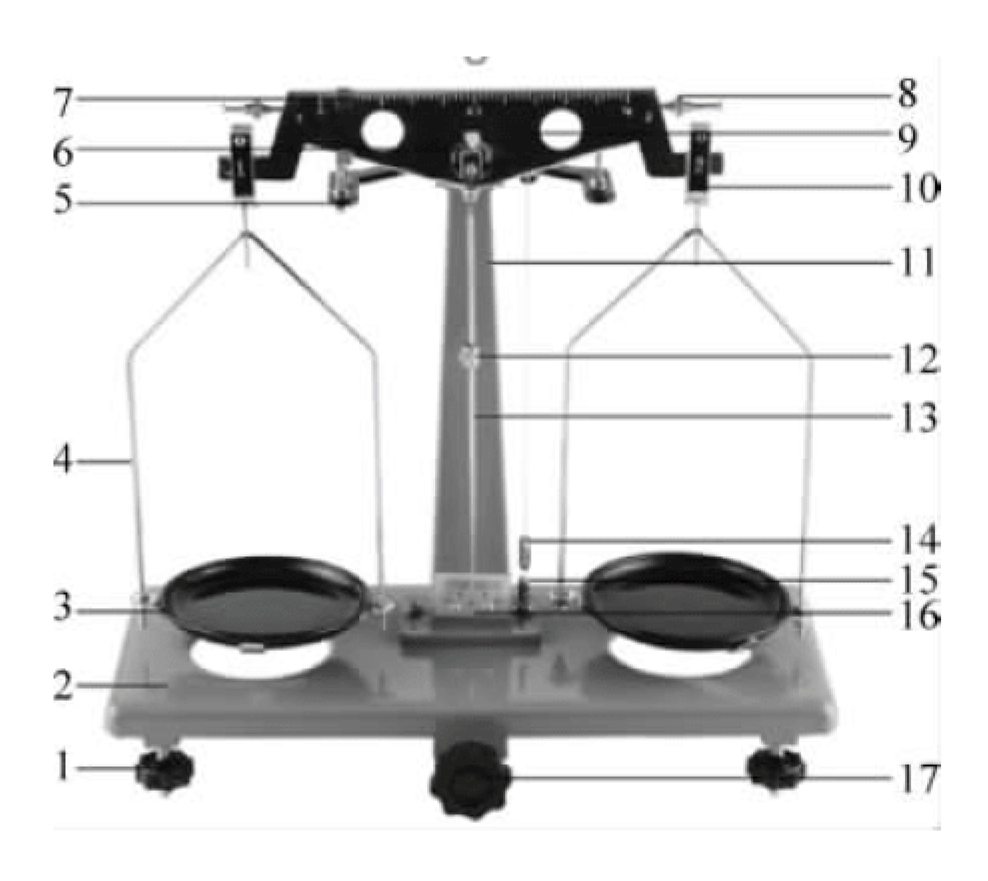



图 3-1-1 物理天平结构示意图

1—调平螺钉(2 个);2—底座;3—托盘(2 个);4—吊篮(2 个);5—托架;6—中刀承;7—游码;8—平衡螺母;9—横梁;10—吊耳(2 个);11—立柱;12—感量砣;13—指针;14—重锤;15—重锤对尖;16—分度盘;17—开关旋钮

物理天平的操作方法如下:

(1) 调节底座水平。调节天平的两个底盘螺钉,使底座上水准器的气泡位于圆环中心,或者观察重锤尖端与底座上尖端是否对准。

(2) 调节天平平衡。把游码移到左端的“0”处,再把制动旋钮向右旋转,支起天平横梁,观察指针的摆动情况。当指针在分度盘的中线左右等振幅摆动时,天平即平衡。如不平衡,应向左旋转制动旋钮放下横梁,再调节横梁两端的平衡螺母,然后再次升起横梁,观察是否平衡。如此反复,直到天平平衡为止。

(3) 称量。先放下横梁,再将待测物体放在左盘内,砝码放在右盘内,升起横梁,观察是否平衡,若不平衡按操作程序反复增减砝码直至平衡为止。

(4) 复原。天平复原,砝码放回砝码盒。

注:实验时用物理天平测量测质量,考虑到物理天平两臂可能存在偏差,测量时采用**互**

**易测量法**来称量待测样品的质量。测量时先把待测样品放在左盘，右盘放砝码，测出质量 $m_1$，然后把样品放在右盘，左盘放砝码再测出其质量 $m_2$，则样品的质量可写为：$m=\sqrt{m_1 m_2}$。

注意事项：

① 天平需调节水平后方能使用；

② 天平的负载量不能超过最大称量值，以免损坏刀口或横梁；

③ 取放物体和砝码、移动游标或调节天平时，都应使天平制动，以保护刀口；

④ 只有在判断天平是否平衡时，才能转动制动旋钮，抬升横梁启动天平；

⑤ 加减砝码时，需用镊子取放，严禁用手；

⑥ 称量完毕时，应将天平横梁放下，以保护刀口。

**3. 游标卡尺（vernier caliper）**

游标卡尺简称卡尺，是测量长度的精密工具之一。常用的卡尺有三种分度，即 $n=50$，20，10，对应的精度分别为 0.02mm，0.05mm，0.10mm，它的外形和结构如图 3-1-2 所示。游标卡尺一般由主尺、副尺（含游标）、量爪和深度尺等组成。副尺可紧贴着主尺滑动，游标固定在副尺上。外量爪用来测量物体的长度和外径，内测量爪用来测量内径，深度尺用来测量深度。

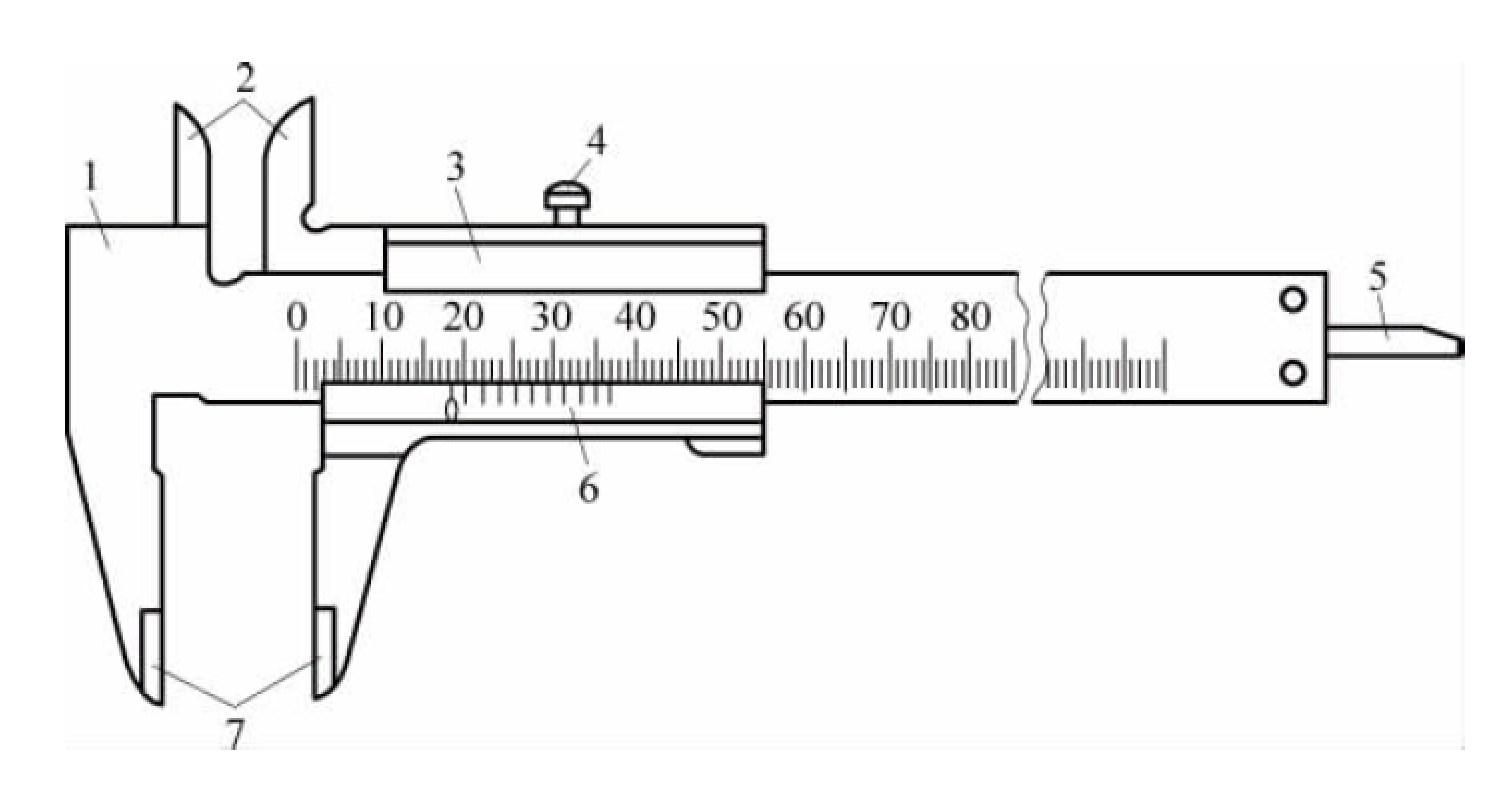



图 3-1-2　游标卡尺示意图

1—主尺；2—内测量爪；3—副尺；4—紧固螺钉；5—深度尺；6—游标；7—外测量爪

游标卡尺的使用方法如下：

（1）测量前，应先把内外两侧的测量爪合拢。检查副尺的“0”线和主尺的“0”线是否对齐。若不对齐，应先记下零点读数，以便对读取的测量值加以修正。

（2）测量时，一手握尺，一手拿物体。将待测物体夹于卡尺的刀口间（注意不要放在凹处），旋紧紧固螺钉。

（3）读数，先读主尺，再读副尺（游标）。即先读出主尺上在游标零线以左的那条线上毫米级以上的读数 $l_0$，即为整数值。然后再仔细找到副尺游标上与主尺刻线准确对齐的那一条刻线，数出这条刻线是副尺上的第 $k$ 条，则待测物体的长度为

$$l=l_0+k\frac{a}{n}$$

其中，$a$ 代表主尺的最小分度值（通常情况下 $a=1\text{mm}$），$n$ 指游标的总分格数。

图 3-1-3 是 $n=10$ 分度的游标卡尺的刻度及读数举例。图上读数：主尺上在游标零线以左的那条线上毫米级以上的读数 $l_0=22.00$，游标尺上与主尺刻线准确对齐的那一条刻线是第 6 条，即 $k=6$，所以待测物体的长度为

$$l = l_0 + k\frac{a}{n} = 22.00 + 6\frac{1}{10} = 22.60\text{mm}$$

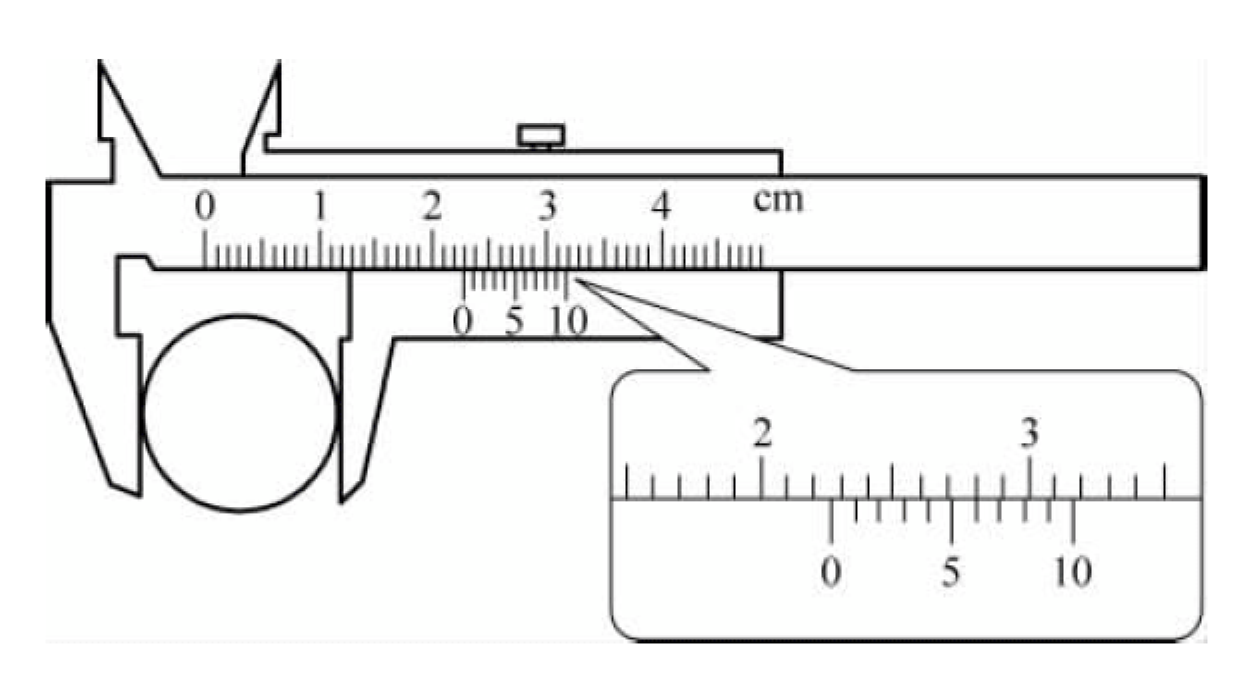



图 3-1-3 游标卡尺读数示意图

**4. 螺旋测微器(micrometer caliper)**

螺旋测微器又称千分尺，它是比游标卡尺更精密的长度测量仪器，其分度值可在 0.01～0.001mm 之间。常用的一种如图 3-1-4 所示，它的量程是 25mm，精确度为 0.01mm。螺旋测微器的主要结构是由一根精密的测微螺杆和有毫米刻度(即固定刻度)的固定套筒组成。固定套筒外有一活动套筒，活动套筒上沿圆周刻有 50 个等分格(可动刻度)，当活动套筒旋转一周，即 50 分格，测微螺杆正好沿轴线方向移动一个螺距 50mm。所以活动套筒转动一分格，螺杆沿轴向移动$\frac{0.5}{50}=0.01$mm，这就是所谓的机械放大原理。

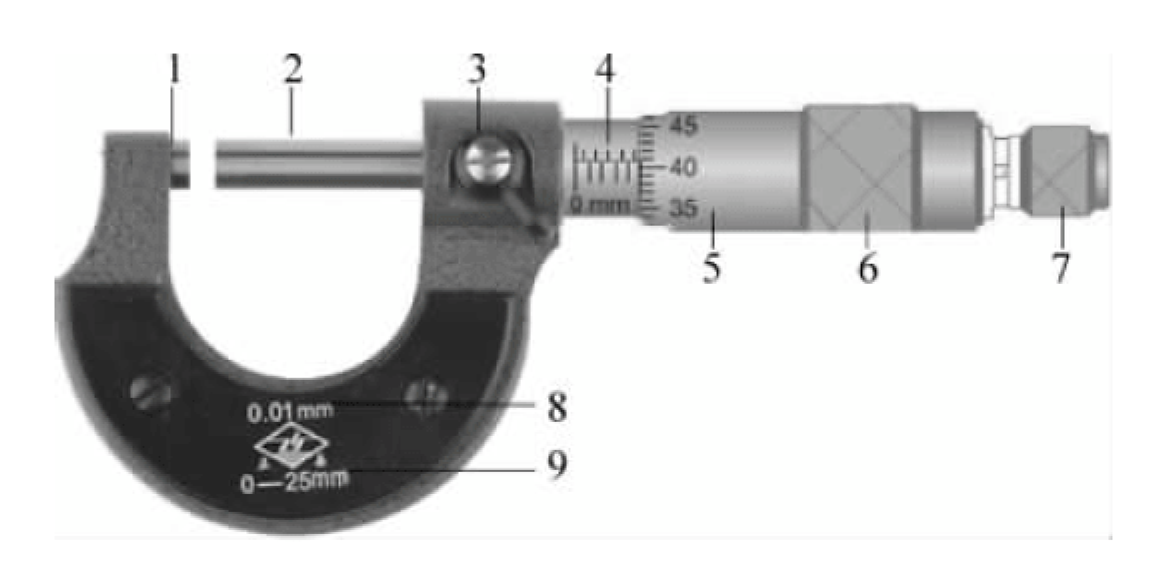



图 3-1-4 螺旋测微器示意图

1—测砧；2—测微螺杆；3—锁紧手柄；4—固定套筒；5—可动刻度；6—活动套筒；7—微调旋钮；8—精度；9—量程

螺旋测微器的使用方法：

(1) 使用前，必须先搞清楚量程和分度值，以及各部件之间的相互关系。

(2) 测量前必须读取初读数 $l_0$。转动微调旋钮，使测微螺杆和测砧刚好接触，并听到“咔、咔、咔”三次声响，即停止转动微调旋钮，读取固定套筒上横线在活动套筒上的示值，即为初读数，如图 3-1-5 所示。注意初读数的正、负值。

(3) 读数时，应先从固定套筒上读出整数格(每格 0.5mm)，再以固定套筒上的水平线为读数准线，读出可动刻度上的分格数(每格 0.01mm)，估计到最小分格的 1/10，即 0.001mm 这一位。螺旋测微器读数举例如图 3-1-6 所示，则待测物体的实际长度 $L=l-l_0$，其

中 $l$ 指末读数，$l_0$ 指初读数。

（4）测量完毕，应使测砧和测微螺杆间留一点间隙，以免因热膨胀而损坏螺纹。

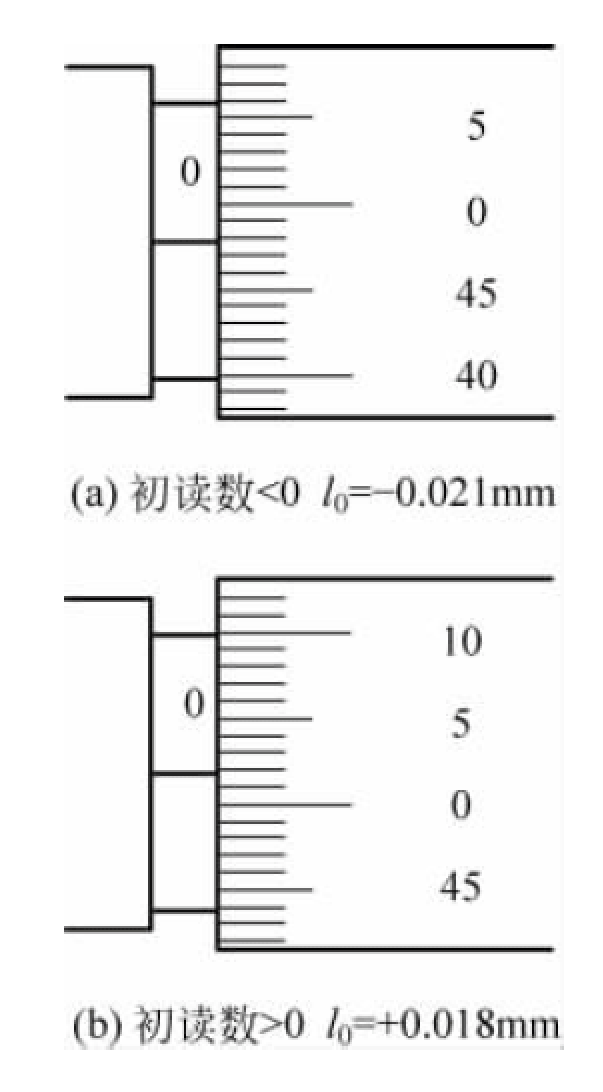



图 3-1-5　千分尺初读数的正和负

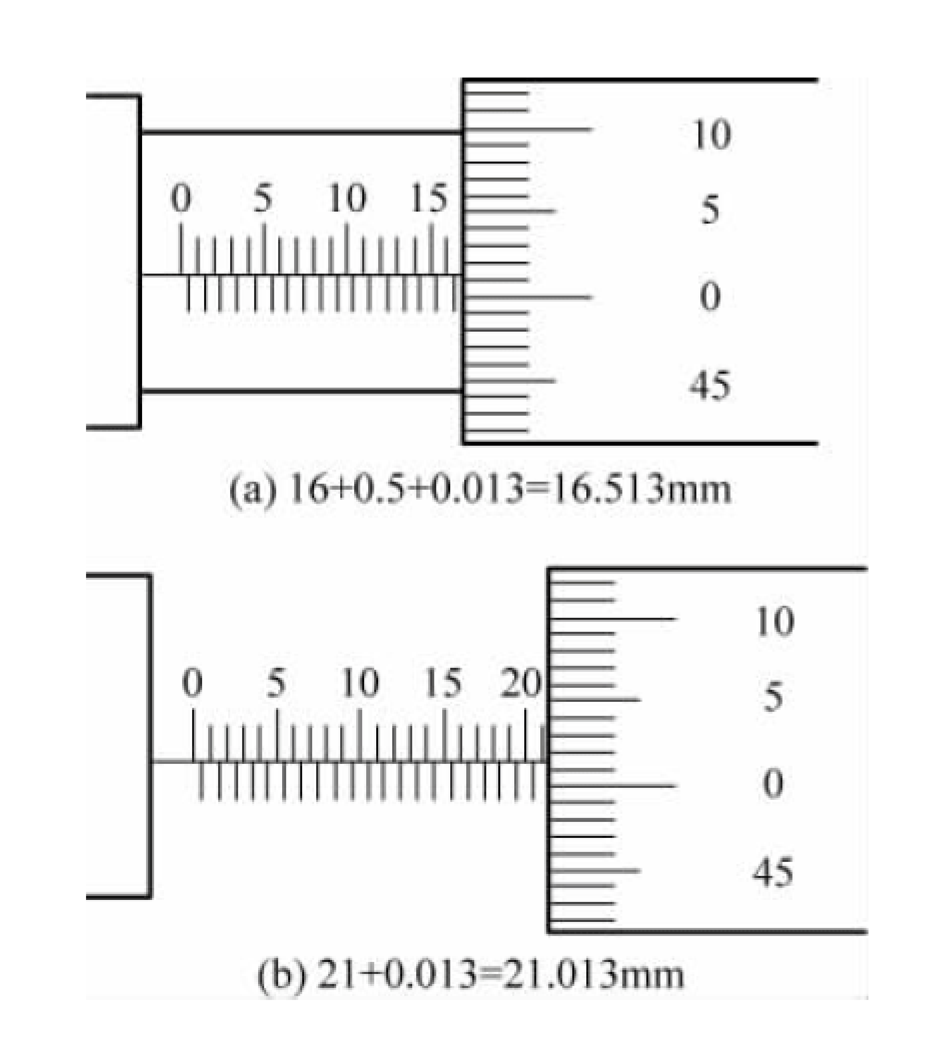



图 3-1-6　千分尺读数举例

## 四、实验内容（experimental content）

（1）首先进行天平的水平调节，再进行天平的平衡调节。调节完毕后才能进行质量测量，最后互易测量金属圆柱体的质量，填到表 3-1-1。

（2）用游标卡尺测量金属圆柱体的高度 $h$（在不同部位测 5 次），填到表 3-1-2。

（3）用螺旋测微计测量金属圆柱体的直径 $D$（在不同部位测 5 次），填到表 3-1-3。

（4）计算圆柱体的密度 $\rho$。

## 五、数据记录及处理（data recording and processing）

### 1. 数据记录（data recording）

**表 3-1-1　测量金属圆柱体的质量**　　$\Delta_{秤}=0.05$g

| 质量 | 样品 | | |
|---|---|---|---|
| | 铜 | 铁 | 铝 |
| $m_1$/g | | | |
| $m_2$/g | | | |
| $m$/g | | | |

**表 3-1-2 测量金属圆柱体的高度 $h$/mm**

卡尺零点读数 $h_0$ = ________ mm　　　　$\Delta_{仪}=0.02$mm

| 金属 | 次数 | | | | | 平均值$\bar{h}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 铜 | | | | | | |
| 铁 | | | | | | |
| 铝 | | | | | | |

**表 3-1-3 测量金属圆柱体的直径 $D$/mm**

螺旋测微计零点读数 $D_0$ = ________ mm　　　　$\Delta_{仪}=0.004$mm

| 金属 | 次数 | | | | | 平均值 $\bar{D}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 铜 | | | | | | |
| 铁 | | | | | | |
| 铝 | | | | | | |

**2. 数据处理(data processing)**

按下列步骤对铜、铁和铝三种样品逐一进行计算,此仅以铜圆柱体为例。

(1) 分别算出 $m,\bar{h},\bar{D}$ 的值,代入公式 $\rho=\frac{4m}{\pi D^2 h}$,计算出 $\bar{\rho}$。

(2) 铜圆柱体的质量测量值和不确定度分别为

$$m=\sqrt{m_1 m_2}$$

$$u_{m_1}=u_{m_2}=\frac{\Delta}{\sqrt{3}}=\frac{0.05}{\sqrt{3}}=0.029(\mathrm{g})$$

(3) 计算铜圆柱体 $h$ 的不确定度 $u_h$

A 类不确定度: $u_A=S(\bar{h})=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i-\bar{h})^2}{n(n-1)}}\ \mathrm{mm}\quad(n=5)$

B 类不确定度: $u_B=\Delta_{仪}/\sqrt{3}\ \mathrm{mm}$

铜圆柱体 $h$ 的不确定度: $u_h=\sqrt{u_A^2+u_B^2}\ \mathrm{mm}$

(4) 计算铜圆柱体 $D$ 的不确定度 $u_D$

A 类不确定度: $u_A=S(\bar{D})=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(D_i-\bar{D})^2}{n(n-1)}}\ \mathrm{mm}\quad(n=5)$

B 类不确定度: $u_B=\Delta_{仪}/\sqrt{3}\ \mathrm{mm}$

铜圆柱体 $D$ 的不确定度: $u_D=\sqrt{u_A^2+u_B^2}\ \mathrm{mm}$

(5) 计算铜圆柱体 $\rho$ 的不确定度 $u_\rho$

相对不确定度为

$$E_r=\sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_1}\right)^2 u_{m_1}^2+\left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_2}\right)^2 u_{m_2}^2+\left(\frac{\partial \ln N}{\partial h}\right)^2 u_h^2+\left(\frac{\partial \ln N}{\partial D}\right)^2 u_D^2}$$

$$=\sqrt{\left(\frac{1}{2m_1}\right)^2 u_{m_1}^2+\left(\frac{1}{2m_2}\right)^2 u_{m_2}^2+\left(\frac{2}{d}\right)^2 u_d^2+\left(\frac{1}{h}\right)^2 u_h^2}$$

不确定度为　$u_\rho=\bar{\rho}\times E_r(\mathrm{g}\cdot\mathrm{mm}^{-3})$

（6）写出测量结果

金属铜圆柱体的高度 $h$：$h=\bar{h}\pm u_h(\mathrm{mm})$

金属铜圆柱体的直径 $D$：$D=\bar{D}\pm u_D(\mathrm{mm})$

金属铜圆柱体的密度 $\rho$：$\rho=\bar{\rho}\pm u_\rho(\mathrm{g}\cdot\mathrm{mm}^{-3})$

## 六、注意事项（cautions）

1. 测量前应该先检查仪器的零点读数。

2. 游标卡尺使用时要注意保护量爪，轻拿轻放，不允许用游标卡尺测量粗糙的物体，不允许把被夹紧的物体在卡口内挪动。

3. 严格按照要求操作仪器，以免损坏仪器。

## 七、思考题（exercises）

1. 根据游标原理，说明 $\frac{1}{20}$mm 和 $\frac{1}{50}$mm 卡尺在读数上的区别。

2. 使用天平应注意哪些问题？所用天平单次测量的不确定度为多少？

3. 游标卡尺与螺旋测微器应如何校准零点？

**关键词（key words）**

游标卡尺（vernier caliper），螺旋测微器（micrometer caliper），天平（balance），物体密度（density of the object），物体的质量（mass of the object ），物体的高度（height of the object），物体的直径（diameter of the object），固体密度的测量（measurement of solid density）

# 实验二 刚体转动惯量的测量

刚体是形状和大小在外力作用下不发生改变的物体，是力学中的一个理想模型。

刚体的基本运动可以用转动定律 $M=J\alpha$ 来描述，其中 $J$ 为刚体的转动惯量。转动惯量是刚体转动惯性大小的量度。在工程技术以及机械制造的生产实践中都要考虑物体转动惯量的大小，所以测量刚体的转动惯量具有十分重要的实际意义。

刚体的转动惯量与刚体的质量、形状、大小和转轴的位置有关，对于形状规则、质量分布均匀的刚体可以通过公式计算得出，然而对于形状复杂、质量分布不均匀的刚体用数学方法计算其转动惯量十分困难，一般用实验方法来测定。测定转动惯量的实验方法很多，本实验是利用智能刚体转动惯量测定仪来测定刚体转动惯量。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 学习用扭摆法测定刚体的转动惯量；
2. 研究刚体的转动惯量与其质量、形状和转轴位置的关系；
3. 研究刚体转动惯量的叠加原理及应用。

## 二、实验原理(experimental principle)

### 1. 基本原理(basic principle)

扭摆的结构示意图如图 3-2-1 所示，在垂直轴上装有一个薄片状的螺旋弹簧，用来产生恢复力矩。在轴的上方可以装上各种待测物体。若将物体在水平面内转过一定角度后，在弹簧回复力矩的作用下，刚体将绕竖直轴作往返的扭转运动。根据胡克定律，弹簧受扭转而产生的回复力矩 $M$ 与所转过的角度 $\theta$ 成正比，即

$$M=-k\theta \tag{3-2-1}$$

式中，$k$ 称为弹簧的扭转常数，$\theta$ 称为扭转角。根据转动定律

$$M=J\alpha \tag{3-2-2}$$

式中，$J$ 为刚体的转动惯量，$\alpha=\frac{d^2\theta}{dt^2}$为刚体的角加速度。

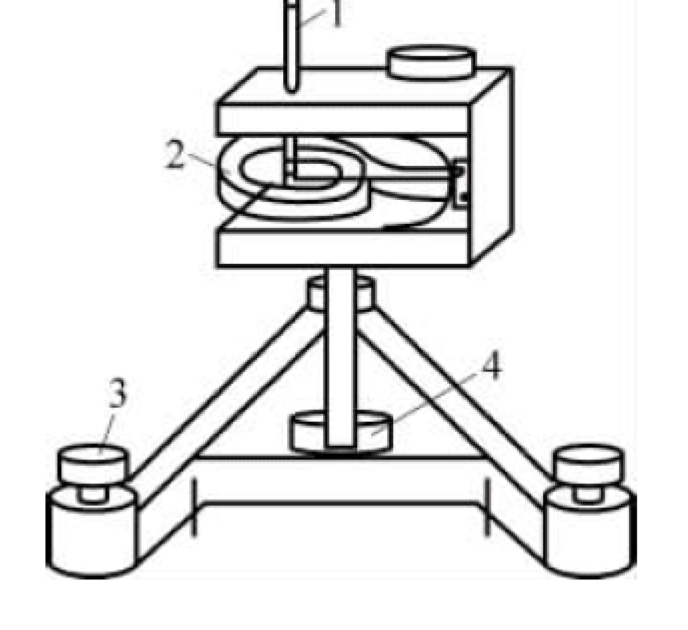


图 3-2-1 扭摆结构图

1—转轴；2—弹簧；3—底座螺钉；4—支架

由式(3-2-1)、式(3-2-2)得 $-k\theta=J\frac{d^2\theta}{dt^2}$，又可写为$\frac{d^2\theta}{dt^2}=-\frac{k}{J}\theta$，若令 $\omega^2=k/J$，则有

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}=-\omega^2\theta \tag{3-2-3}$$

式(3-2-3)称为扭摆运动的角简谐振动方程。表示刚体的角加速度与角位移 $\theta$ 成正比，且方向相反，其解为

$$\theta=A\cos(\omega t+\varphi)$$

式中，$A$ 称为简谐振动的振幅，$\omega$ 称为角频率，$\varphi$ 称为初相位。此简谐振动的周期为

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{J}{k}} \tag{3-2-4}$$

由式(3-2-4)，可得

$$J=\frac{kT^2}{4\pi^2} \tag{3-2-5}$$

由此可知，通过实验测得刚体的扭摆周期 $T$ 及扭转常数 $k$，则可计算出刚体的转动惯量 $J$。

**2. 测定弹簧的扭转常数 $k$(Determining the torsional constant $k$ of springs)**

由式(3-2-5)可知，我们可以用一个形状规则的标准圆柱体来测定弹簧的扭转常数 $k$，其绕圆柱体轴线的转动惯量可根据其质量和几何尺寸用理论公式计算求得，即

$$J_0=\frac{1}{2}m_0R^2=\frac{1}{8}m_0D^2$$

式中，$J_0$ 为标准圆柱体的转动惯量，$m_0$ 为圆柱体的质量，$D$ 为圆柱体的直径。

首先将金属载物盘放到扭摆上，测出其周期 $T'$，则金属载物盘的转动惯量为

$$J'=\frac{kT'^2}{4\pi^2} \tag{3-2-6}$$

再将标准圆柱体固定在金属载物盘上，测出其周期 $T_0$，则有

$$J'+J_0=\frac{kT_0^2}{4\pi^2} \tag{3-2-7}$$

由式(3-2-6)和式(3-2-7)可得

$$\begin{cases} J'=\dfrac{J_0T'^2}{T_0^2-T'^2} \\ k=4\pi^2\dfrac{J_0}{T_0^2-T'^2} \end{cases} \tag{3-2-8}$$

则只需将其他待测刚体固定在金属载物盘中，测定其周期，便可求出待测刚体绕竖直轴转动时的转动惯量。

## 三、实验仪器(experimental device)

智能刚体转动惯量测试仪、游标卡尺、电子天平、米尺、标准圆柱体、待测转动惯量的若干形状刚体等。

**1. 智能转动惯量测试仪基本原理**

图 3-2-2 是测量摆动周期装置示意图。当挡光杆通过光电门时，遮住光电探头发射光路。光电门输出低电压，触发计时/数器。同时计数器递减计算，直到计数完毕，计时自动停止，即可计算测量周期 T。

**2. 智能转动惯量测试仪的使用方法**

(1) 开启主机电源，摆动指示灯亮，参量指示为“$P_1$”。

(2) 按“功能”键，可以选择摆动、转动两种功能。开机及复位默认值为摆动。

(3) 本机默认扭摆的周期数为 10，如需更改，选择“置数”键上下调节。但一旦切断电源



图 3-2-2 测量摆动周期装置图

或按“复位”键，便恢复原厂设置。

(4) 按“执行”键，仪器显示“$P_1$，000.0”，表示仪器已经处在等待测量状态。挡光杆通过光电门时，计数器开始计数。当计数达到预设值，显示屏上显示时间读数。

(5) 按“查询”键，可知每次测量的周期平均值。

(6) 按“返回”键，系统无条件地回到最初出厂默认状态。

(7) 按“复位”键，实验所得数据全部清除，恢复初始默认状态。

## 四、实验内容(experimental content)

1. 调整扭摆底座螺钉，使水平仪的气泡位于中心。装上金属载物盘，并调整光电探头的位置使载物盘上挡光杆处于其缺口中央且能遮住发射、接收红外线的小孔。为维持弹簧的扭转常数 $k$ 值不变，摆角在 90°左右为宜。将支架套入扭摆主轴，并旋紧制动螺钉。

2. 测量金属载物盘的转动惯量 $J'$ 和弹簧的扭转常数 $k$。

(1) 测量金属载物盘的摆动周期 $T'$，测 3 次，求平均值；

(2) 测量标准圆柱体的质量 $m_0$；

(3) 测量标准圆柱体的直径 $D_0$，测 3 次，求平均值；

(4) 将标准圆柱体垂直放在载物盘中，测量其摆动周期 $T_0$，测 3 次，求平均值；数据记录于表 3-2-1。

3. 测量硬塑圆柱体的转动惯量 $J_1$。

(1) 测量硬塑圆柱体的质量 $m_1$；

(2) 测量硬塑圆柱体的直径 $D_1$，测 3 次，求平均值；

(3) 将硬塑圆柱体垂直放在载物盘中，测定其摆动周期 $T_1$，测 3 次，求平均值；数据记录于表 3-2-1。

4. 测量金属圆筒的转动惯量 $J_2$。

(1) 测量金属圆筒的质量 $m_2$；

(2) 测量金属圆筒的内径 $D_{内}$ 和外径 $D_{外}$，各测 3 次，求平均值；

(3) 将金属圆筒垂直放在载物盘中，测定其摆动周期 $T_2$，测 3 次，求平均值；数据记录于表 3-2-1。

5. 测量金属细杆的转动惯量 $J_3$（转轴在中心）和 $J_4$（转轴在一端）。

（1）测量金属细杆的长度 $l$ 和质量 $m_3$；

（2）取下金属载物盘，换上金属细杆，并旋紧制动螺钉，测量金属细杆转轴在中心的转动周期 $T_3$，测 3 次，求平均值；

（3）测量金属细杆转轴在一端的转动周期 $T_4$，测 3 次，求平均值；数据记录于表 3-2-1。

## 五、数据记录及处理（data recording and processing）

### 1. 数据记录（data recording）

**表 3-2-1　扭摆法测刚体转动惯量的实验数据**

| 样品 | 物理量/单位 | 1 | 2 | 3 | 平均值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 金属载物盘 | $T'/\mathrm{s}$ | | | | $\overline{T'}=$ |
| 标准圆柱体 | $D_0/10^{-2}\mathrm{m}$ | | | | $\overline{D}_0=$ |
| $m_0=$　kg | $T_0/\mathrm{s}$ | | | | $\overline{T}_0=$ |
| 硬塑圆柱体 | $D_1/10^{-2}\mathrm{m}$ | | | | $\overline{D}_1=$ |
| $m_1=$　kg | $T_1/\mathrm{s}$ | | | | $\overline{T}_1=$ |
| 金属圆筒 | $D_{内}/10^{-2}\mathrm{m}$ | | | | $\overline{D}_{内}=$ |
| $m_2=$　kg | $D_{外}/10^{-2}\mathrm{m}$ | | | | $\overline{D}_{外}=$ |
| | $T_2/\mathrm{s}$ | | | | $\overline{T}_2=$ |
| 金属细杆 $m_3=$　kg | $T_3/\mathrm{s}$ | | | | $\overline{T}_3=$ |
| $l=$　m | $T_4/\mathrm{s}$ | | | | $\overline{T}_4=$ |

### 2. 数据处理（data processing）

（1）计算标准圆柱体的转动惯量 $J_0=\frac{1}{8}m_0\overline{D}_0^2$；

（2）计算金属载物盘的转动惯量 $J'=\frac{J_0\overline{T}'^2}{\overline{T}_0^2-\overline{T}'^2}$；

（3）计算出扭转常数 $k=4\pi^2\ \frac{J_0}{\overline{T}_0^2-\overline{T}'^2}$。

（4）分别计算金属圆筒、硬塑圆柱体以及金属细杆等样品的转动惯量实验值和理论值，将实验值与理论值比较，并分析误差的大小。参见表 3-2-2。

**表 3-2-2　转动惯量的实验测量值与理论计算值对照表**

| 样品 | 转动惯量理论值/（$10^{-4}\mathrm{kg\cdot m^2}$） | 转动惯量实验值/（$10^{-4}\mathrm{kg\cdot m^2}$） | 相对误差 $E_r=\frac{J_{实}-J_{理}}{J_{理}}\times100\%$ |
|---|---|---|---|
| 硬塑圆柱体 | $J_1'=\frac{1}{8}m\overline{D}_1^2$ | $J_1=\frac{k\overline{T}_1^2}{4\pi^2}-J'$ | |
| | | | |

续表

| 样品 | | 转动惯量理论值/($10^{-4}$kg・m$^2$) | 转动惯量实验值/($10^{-4}$kg・m$^2$) | 相对误差 $E_r=\frac{J_{实}-J_{理}}{J_{理}}\times 100\%$ |
|---|---|---|---|---|
| 金属圆筒 | | $J_2'=\frac{1}{8}m(\bar{D}_{内}^2+\bar{D}_{外}^2)$ | $J_2=\frac{k\bar{T}_2^2}{4\pi^2}-J'$ | |
| | | | | |
| 金属细杆 | 转轴在中心 | $J_3'=\frac{1}{12}ml^2$ | $J_3=\frac{k\bar{T}_3^2}{4\pi^2}$ | |
| | | | | |
| | 转轴过一端 | $J_4'=\frac{1}{3}ml^2$ | $J_4=\frac{k\bar{T}_4^2}{4\pi^2}$ | |
| | | | | |

## 六、注意事项(cautions)

1. 实验前应调整测定仪的支脚螺钉,使水平仪保持水平状态。
2. 光电探头不能置于强光下,实验室应采用窗帘遮光,以确保计时准确。
3. 弹簧的扭转常数 $k$ 值不是固定常数,与摆角有关,当摆角在 $90°$左右时基本相同,而在小角度时会变小。为降低由于摆动角度变化过大而带来的系统误差,在测量各物体的摆动周期时,摆角不宜过小,摆幅也不宜变化过大。
4. 安装待测物体时,其支架必须全部套入扭摆主轴,并旋紧制动螺钉,以保证扭摆正常工作。
5. 在称金属细杆的质量时,必须将支架取下,否则会带来极大误差。

## 七、思考题(exercises)

1. 如何测定扭转常数 $k$ 值?
2. 如何减少实验误差?
3. 将金属细杆转动惯量的实验值与理论值比较,说明产生误差的原因。
4. 通过实验结果,分析转动惯量的相关因素。

**关键词(key words)**

转动惯量(moment of inertia),扭转常数(torsion constant),扭摆法(torsion-pendulum method),质心轴(center-of-mass axis),测量直径(measurement of the diameter),周期(period),刚体转动惯量的测量(measurement of rigid body's moment of inertia)

# 实验三　杨氏模量的测定

杨氏模量是工程材料的重要参数，是表征固体材料抵抗纵向形变能力的一个重要物理量，它反映了材料弹性变形与内应力的关系。杨氏模量与外力、物体的长度、截面积的大小等无关，而只取决于物体材料本身的性质。杨氏模量是选择机械构件和建筑材料的重要依据，因此对工程材料杨氏模量的准确测量具有重要意义。观测杨氏模量的方法很多，目前精确、准确和科学的测量方法为 CCD 法，该方法实验测量杨氏模量的相对误差仅为 0.88%，大大提高了测量精度。这一技术可直接运用于有关材料的杨氏模量测量上。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 学会测量杨氏模量的一种方法；
2. 学会用逐差法处理数据。

## 二、实验原理（experimental principle）

设有一根粗细均匀，长为 $L$、截面积为 $S$ 的金属丝。将其上端固定，下端悬挂砝码，金属丝受外力 $F$ 的作用而发生形变，伸长了 $\Delta L$。根据胡克定律：在弹性限度内，其相对伸长量 $\Delta L/L$（称为应变）与外力使其单位截面积所受力 $F/S$（称为应力）成正比；即在弹性限度内，应力与应变成正比。胡克定律的数学表达式为

$$\frac{F}{S} = Y\frac{\Delta L}{L} \tag{3-3-1}$$

式中，$Y$ 称为金属丝的弹性模量，即杨氏模量，单位是 Pa，记作 $\mathrm{N \cdot m^{-2}}$。

由式(3-3-1)，可得

$$Y = \frac{F/S}{\Delta L/L} \tag{3-3-2}$$

若金属丝的直径为 $d$，则其截面积 $S=\pi(d/2)^2=\pi d^2/4$，则式(3-3-2)可改写为

$$Y = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L} \tag{3-3-3}$$

由式(3-3-3)可知，只要能测出 $F$,$L$,$d$ 和 $\Delta L$ 就能计算出金属丝的杨氏模量。式(3-3-3)还表明，当长度 $L$、直径 $d$ 和外力 $F$ 都相同时，杨氏模量大的金属丝的伸长量较小。对于 $F$,$L$,$d$ 都比较容易测量，唯有 $\Delta L$ 因为十分微小，不容易测量准确。为了能够准确测量出这样微小的伸长量，本实验采用显微镜读数和 CCD 成像技术，调节使用方便，实验装置示意图如图 3-3-1 所示。在悬垂的金属丝下端相继连接有“十字叉丝”板（在金属框内）和砝码盘，当砝码盘中加上质量为 $M$ 的砝码时，金属丝受力增加了 $F=Mg$，金属丝相应伸长了 $\Delta L$，“十字叉丝”也随着下降 $\Delta L$。“十字叉丝”通过读数显微镜的物镜成像在最小分度为 0.05mm 的分划板标尺上，再被目镜放大，在望远镜目镜视场中可以观察并直接测量金属丝的伸长量

$\Delta L$。实验中是用 CCD 系统代替眼睛，其优点是便于观察和测量 $\Delta L$，同时减轻视觉疲劳。CCD 摄像机镜头将显微镜的光学图像汇聚并转换成视频信号传送到监视器，可供观察与测量。

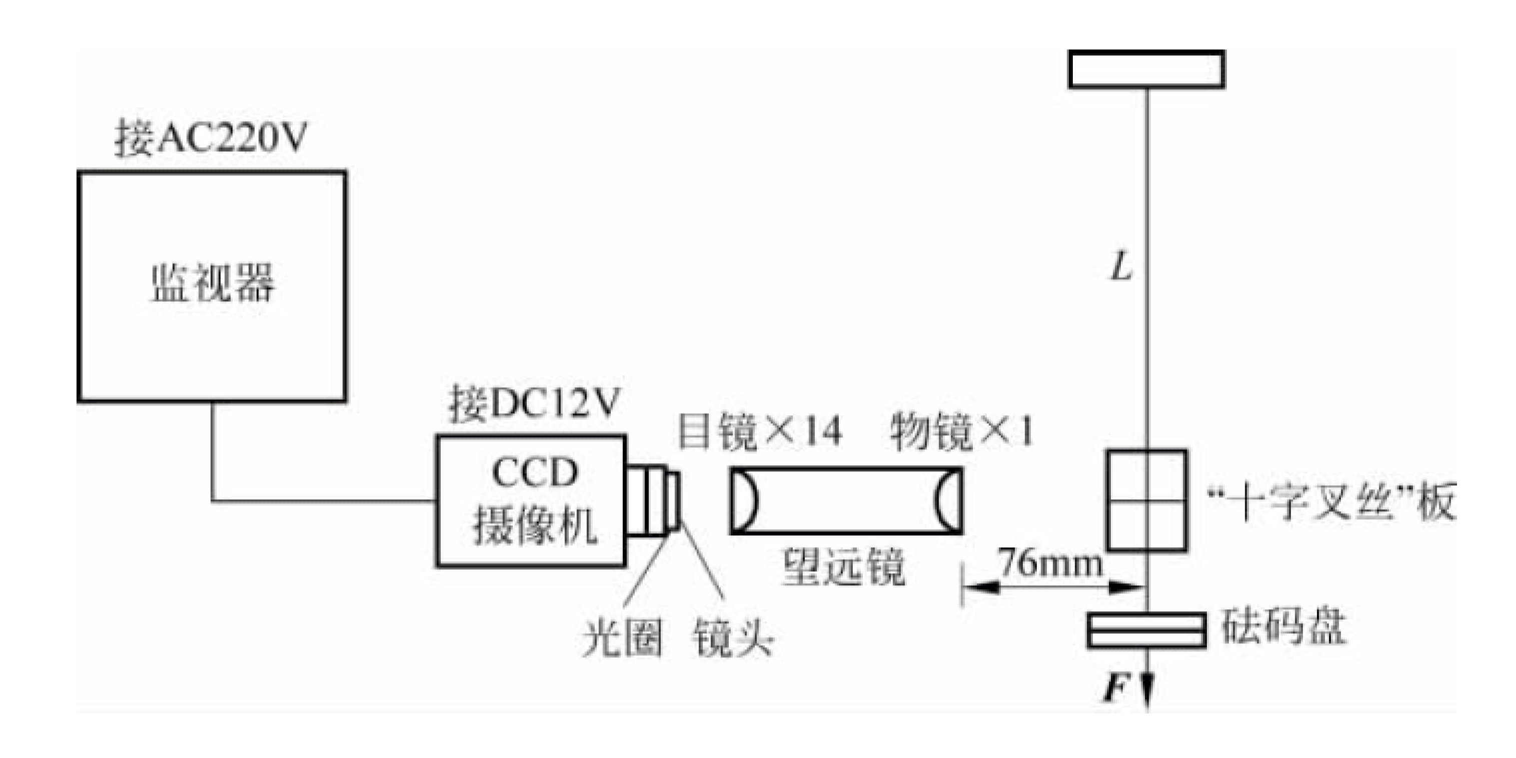



图 3-3-1　实验装置示意图

## 三、实验仪器（experimental device）

CCD 杨氏模量测定仪、螺旋测微计、米尺，待测金属丝、砝码等。

## 四、实验内容（experimental content）

**1. 调整杨氏模量测定仪（adjusting Young's modulus tester）**

1）调节支架

先调节仪器底脚螺钉，使底座水平，再调节上梁微调旋钮调节夹板水平，以保证穿过夹板的金属丝不贴靠小孔内壁。然后调节下梁一侧的防摆动装置，将两螺钉分别旋进金属连接框两侧的 V 形槽内，并与框体之间形成两个很小间隙，以使金属框既能随金属丝一起上下自由移动，又避免发生扭转和摆动。

2）调节读数显微镜

将安装有读数显微镜的磁性底座紧紧靠住仪器底座表面上的定位板直边，按读数显微镜的工作距离（76mm）大致确定显微镜的物镜与"十字叉丝"板的距离。将眼睛对准目镜，并转动目镜，对分划板标尺进行调焦，直到在视场中能观察到清晰的分划板标尺为止。沿定位板稍微移动磁性底座，在视场中的分划板标尺上找到清楚的"十字叉丝"的像，再稍微调整磁性底座上的升降微调旋钮（读数显微镜横向及升降可微调），使分划板标尺的零线（可在 0～1mm 之间选择）对准"十字叉丝"的横线（见图 3-3-2），并微调目镜，消除视差，之后将磁性底座的旋钮向前扳动锁住磁性底座。

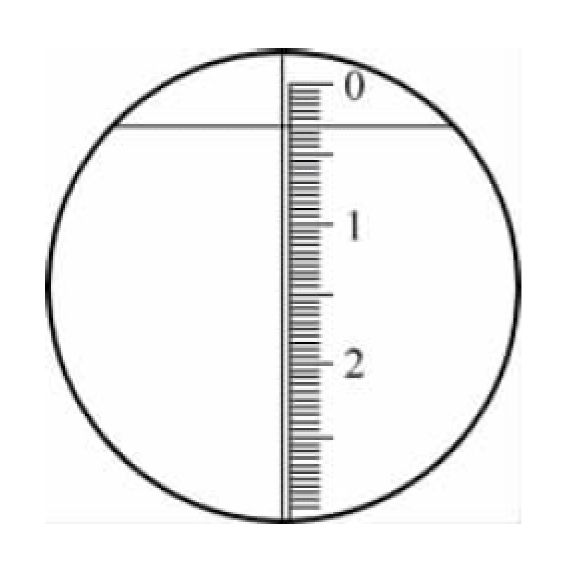



图 3-3-2　"十字叉丝"与分划板标尺

3）调节 CCD 成像系统

（1）摄像机的调节：将摄像机的磁性底座紧紧靠住定位板直边，镜头对准读数显微镜，

并与其目镜相距约 1cm，然后锁紧磁性底座；将视频电缆线一端接入摄像机后面板的视频输出口(VIDEO OUT)，另一端接入监视器背面的视频输入口(VIDEO IN)，并将摄像机专用 12V 直流电源的输出插头接入摄像机后面板的电源输入插口内(DC12V IN)。

(2) 调节视频监视器：监视器屏幕下方的 4 个旋钮从左至右依次为调节水平扫描、垂直扫描、亮度和对比度。监视器背面有电源孔，将 220V 电源接入，开启屏幕右下方的电源开关，待屏幕上显示图像后，调节水平扫描和垂直扫描使图像稳定。调节亮度和对比度，对比度宜大一些，亮度应适中。

(3) 图像清晰的调节：对摄像机镜头调焦(顺时针方向为远——FAR；逆时针方向为近——NEAR)；然后调节光圈(顺时针方向为开小——CLOSE；逆时针方向为开大——OPEN)；再配合调节读数显微镜的目镜，直到在监视器屏幕呈现清晰的图像为止。

**2. 观测细丝伸缩变化(observation of changes in wire scaling)**

1) 调整好仪器并在监视器屏幕呈现清晰的图像后，记下此时(待测细丝下的砝码盘在未加砝码时)"十字叉丝"对准的分划板标尺的零点值 $n_1$。

2) 在砝码盘上每次增加 200g 砝码，加到 1400g 为止，即依次放入 200g，400g，600g，800g，1000g，1200g，1400g 砝码，观察监视器屏幕并逐个记录每增加 200g 砝码相应"十字叉丝"对准的分划板标尺的刻度值 $n_2, n_3, \cdots, n_7, n_8$。读数应该估读到标尺最小刻度的下一位，标尺最小分度 0.05mm。然后再按相反顺序逐个减少砝码数，记录相应"十字叉丝"对准的标尺刻度 $n_8', n_7', \cdots, n_2', n_1'$；数据填入表 3-3-1。

3) 用螺旋测微器测量金属丝的直径 $d_i$，考虑到金属丝各处可能存在的不均匀性，应在不同部位测量 10 次取其平均值，数据填入表 3-3-2。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

**1. 数据记录(data recording)**

表 3-3-1　金属丝受力伸长的测量数据　　$\Delta_{标}=0.05$mm

| 次数 $i$ | 砝码质量 $M$/g | 拉力 $F_i=Mg$/N | 标尺刻度值 | | 平均伸长量/mm | 每增加一个砝码时金属丝的伸长量 $\Delta L_i=(L_{i+1}-L_i)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 增加砝码过程 $n_i$ | 减少砝码过程 $n_i'$ | $L_i=\frac{1}{2}(n_i+n_i')\times 0.05$ | |
| 1 | 0 | 0 | | | | |
| 2 | 200 | 1.96 | | | | |
| 3 | 400 | 3.92 | | | | |
| 4 | 600 | 5.88 | | | | |
| 5 | 800 | 7.84 | | | | |
| 6 | 1000 | 9.80 | | | | |
| 7 | 1200 | 11.76 | | | | |
| 8 | 1400 | 13.72 | | | | |

表 3-3-2 金属丝的直径

螺旋测微计零点读数 $d_0$ = ________ mm　　　　$\Delta_{仪}=0.004$mm

| | 次数 | | | | | | | | | | 平均值 $\overline{d}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 直径 $d$/mm | | | | | | | | | | | |

**2. 数据处理(data processing)**

1) 计算伸长量的平均值 $L_1, L_2, \cdots, L_8$，填入表 3-3-1。

2) 计算出每次增加一个砝码时金属丝的伸长量 $\Delta L_i$，填入表 3-3-1。

3) 用逐差法计算平均每增加(减少)一个砝码时，金属丝平均伸长量 $\overline{\Delta L}$，过程如表 3-3-3 所示。

表 3-3-3 用逐差法计算金属丝的平均伸长量 $\overline{\Delta L}$

| 次数 $i$ | $L_{4+i}$ | $L_i$ | $L_{4+i}-L_i$ | $\overline{\Delta L}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | $\overline{\Delta L}=\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(L_{4+i}-L_i)}{4^2}=$ |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |

4) 计算金属丝的平均伸长量 $\overline{\Delta L}$ 的不确定度 $u_{\overline{\Delta L}}$：

A 类不确定度：$u_A = S(\overline{\Delta L}) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta L_i - \overline{\Delta L})^2}{n(n-1)}}$ mm　$(n=7)$

B 类不确定度：$u_B = \Delta_{仪}/\sqrt{3}$ mm，$\Delta_{仪}=0.05$mm

合成不确定度：$u_{\overline{\Delta L}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$

测量结果：$\Delta L = \overline{\Delta L} \pm u_{\overline{\Delta L}}$ (mm)

5) 计算细丝直径的平均值 $\overline{d}$ 和不确定度 $u_d$：

A 类不确定度：$u_A = S(\overline{d}) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(d_i - \overline{d})^2}{n(n-1)}}$ mm　$(n=10)$

B 类不确定度：$u_B = \Delta_{仪}/\sqrt{3}$ mm

合成不确定度：$u_d = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$

测量结果：$d = \overline{d} \pm u_d$ (mm)

6) 拉力增量 $\Delta F=1.96$N，按 OIML 砝码规定等级 M3[①]，$\Delta_{码}=100$mg，则拉力增量 $\Delta F$

① OIML 是“国际法定度量衡组织”的法文缩写，M3 是砝码规范最低等级。

的不确定度为 $u_{\Delta F}=\frac{\Delta_{码}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{\Delta F}{\Delta M}=\frac{0.1\times1.96}{200\sqrt{3}}=0.001(\text{N})$。

7）本实验给定金属丝的长度 $L=0.800\text{m}$，由于金属丝被夹紧的位置难以准确判定，一般可认为 $\Delta_{米}=5\text{mm}$，则长度 $L$ 的不确定度 $u_L=\frac{\Delta_{米}}{\sqrt{3}}=\frac{0.005}{\sqrt{3}}=0.0029(\text{m})$。

8）根据公式 $Y=\frac{4FL}{\pi d^2\Delta L}=\frac{4MgL}{\pi\bar{d}^2\overline{\Delta L}}$，计算出金属丝的杨氏模量，其中 $g=9.8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$。

9）计算金属丝杨氏模量的不确定度 $u_Y$，并正确表示出实验测量结果：

相对不确定度：$E_r=\sqrt{\left[\frac{u_{\Delta F}}{\Delta F}\right]^2+\left[\frac{u_L}{L}\right]^2+\left[\frac{u_{\overline{\Delta L}}}{\overline{\Delta L}}\right]^2+\left[\frac{2u_d}{\bar{d}}\right]^2}$

不确定度：$u_Y=\bar{Y}\times E_r(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$

测量结果：$Y=\bar{Y}\pm u_Y(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$

## 六、注意事项（cautions）

1. 进行金属丝受力伸长的测量时，需等望远镜中标尺成像稳定后再进行读数。
2. 测量过程中，切勿改变光学系统。
3. 增加砝码时，砝码槽口要交替放置。
4. 加减砝码时必须轻拿轻放，以防止摆动过大和使金属丝受到冲击作用，待稳定后再进行读数。

## 七、思考题（exercises）

材料相同，但长短粗细不同两根钢丝的杨氏模量是否相同，为什么？

**关键词（key words）**

杨氏模量（Young's modulus），胡克定律（Hooke's law），应力（stress），砝码（weight），伸长量（elongation），弹性（elasticity），望远镜（telescope），目镜（ocular），物镜（object lens）

# 实验四　惠斯通电桥法测电阻

电桥法测电阻是一种典型的比较测量法，即将被测量与同类标准量进行比较，从而确定被测量的大小。电桥从使用电源性质分为直流电桥和交流电桥；从结构不同又分为单臂电桥和双臂电桥；从指示状态不同分为平衡电桥和非平衡电桥。惠斯通电桥属于直流平衡单臂电桥，用来测量中等阻值（范围为 $1\sim11.1\times10^6\Omega$）的电阻，具有较高的灵敏度和准确度。尽管各种电桥的测量对象、构造各异，但基本原理和思想方法大致相同，所以掌握了惠斯通电桥的原理和使用方法对分析其他电桥的原理和方法奠定了基础。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 了解惠斯通电桥的基本原理及电桥测量灵敏度的概念；
2. 学会用惠斯通电桥测量电阻；
3. 能够分析测量的误差。

## 二、实验原理（experimental principle）

### 1. 惠斯通电桥平衡条件（condition of Wheatstone bridge balance）

如图 3-4-1 所示为惠斯通电桥原理电路图，它由四个桥臂电阻 $R_1,R_2,R_x,R_0$ 和一个检流计 G 组成的桥式电路。其中，$R_1,R_2$ 是已知标准电阻，称为比率臂；$R_0$ 是可变标准电阻（电阻箱），称为比较臂；$R_x$ 是被测电阻，称为测量臂；$C,D$ 间接检流计。接通电路后，检流计一般不为零，说明 $C,D$ 两点的电势不相等，通过调节 $R_x$ 使检流计中无电流通过，即 $I_G=0$，此时电桥达到平衡。

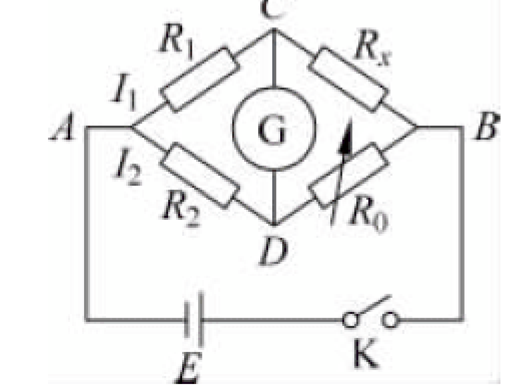


图 3-4-1　惠斯通电桥原理

由图可知，电桥平衡时，$C,D$ 两点的电势相等，通过检流计 G 的电流为零。即

$$I_1R_1 = I_2R_2$$
$$I_1R_x = I_2R_0$$

此两式两边相除，可得 $R_1,R_2,R_x,R_0$ 四个电阻的关系，即

$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_x}{R_0} \tag{3-4-1}$$

式(3-4-1)称为电桥平衡条件。因此当电桥平衡时，只需知道四个电阻中的任意三个电阻，就可计算出另外一个电阻的阻值。由式(3-4-1)变换，有

$$R_x=\frac{R_1}{R_2}R_0 \tag{3-4-2}$$

令 $K_r=R_1/R_2$，称为倍率，则式(3-4-2)可写为 $R_x=K_rR_0$。因此调电桥平衡时，一般是根据待测电阻的大小选好倍率，再调比较臂，只要读出倍率 $K_r$ 和 $R_0$ 值，便可得待测电阻 $R_x$。

**2. 电桥灵敏度(bridge sensitivity)**

惠斯通电桥测电阻的准确度与电桥的灵敏度相关。对同一待测电阻而言,灵敏度的值越大,测量结果越准确。惠斯通电桥灵敏度定义为

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_x / R_x} \tag{3-4-3}$$

其中,$R_x$ 是待测电阻值,$\Delta n$ 是 $R_x$ 改变 $\Delta R_x$ 时检流计 G 偏转的格数(DIV)。一般 $R_x$ 不可调,所以通常用改变 $R_0$ 来测灵敏度,于是电桥灵敏度也称相对灵敏度

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_0 / R_0} \tag{3-4-4}$$

## 三、实验仪器(experimental device)

待测电阻和导线、QJ23a 箱式惠斯通电桥(portable QJ23a-Wheatstone bridge )。

箱式电桥型号较多,现以 QJ23 箱式惠斯通电桥(如图 3-4-1 所示)为例介绍电桥各部件的特点和作用。测量盘由×1Ω,×10Ω,×100Ω,×1000Ω 四组十进制式开关盘组成,在电桥使用中,必须用上第 1 测量盘(×1000),即第 1 测量盘不能置于 0,才能保证测量的准确度。按钮"B"代表电源开关,按钮"G"代表检流计开关。在测量含有电感的电阻器电阻时(如电机、变压器),必须先按"B"按钮,再按"G"按钮。

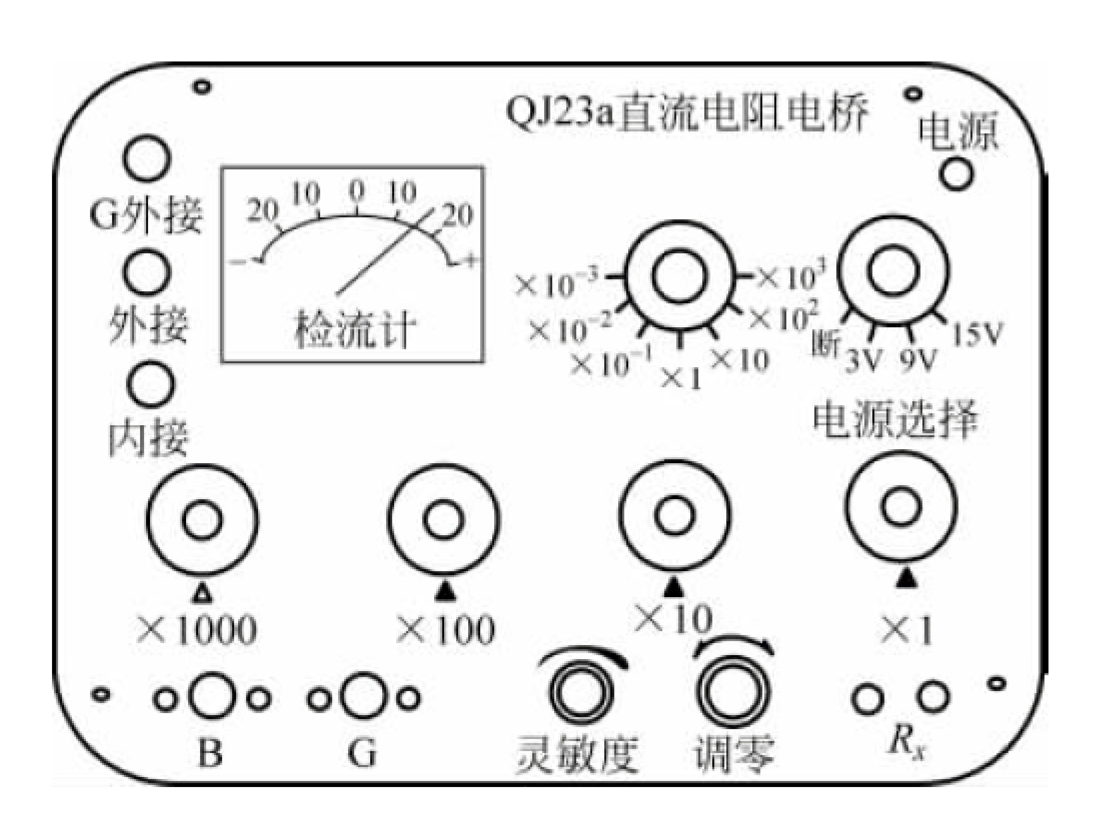



图 3-4-1 QJ23a 箱式惠斯通电桥面板结构图

QJ23a 箱式惠斯通电桥的使用方法:

(1) 接通 220V 市电,并开启电源开关,指示灯亮。并将"G"打向"内接";

(2) 将被测电阻接至"$R_x$"接线柱,估计被测电阻的数值,根据表 3-4-1 选择好量程倍率及电源电压,并将"倍率 $K_r$"(即 $R_1/R_2$)开关及"电源选择"开关打在合适的挡位,调节"调零"旋钮使检流计表头指针指零。

(3) 按下"B"按钮,然后轻按"G"按钮,调节测量盘,使电桥平衡(检流计指零)。若电桥无法平衡,检流计指针仍向"+"方向偏转,说明 $R_x$ 值大于该量程的上限值,应将量程倍率调大一挡,再次调节四个测量盘,使电桥平衡。反之,当第 1 测量盘(×1000)打至"0"位,检流计指针仍偏向"-"方向,应将量程倍率减小一挡,再调节测量盘使电桥平衡。则所测电阻

值：$R_x$＝量程倍率×测量盘示值之和(即 $R_0$)。

表 3-4-1 量程与倍率及电源电压对照表

| 倍 率 | 量 程 | 准确度等级 $K$ | 电 源 |
|---|---|---|---|
| ×0.001 | 1～11.11Ω | 0.5 | 3V |
| ×0.01 | 10～111.1Ω | 0.2 | |
| ×0.1 | 100～1111Ω | 0.1 | |
| ×1 | 1～11.11kΩ | | |
| ×10 | 10～111.1kΩ | 0.1 | 9V |
| ×100 | 100～499.9kΩ | 0.2 | 15V |
| | 500～1111kΩ | 0.2 | |
| ×1000 | 1～4.999MΩ | 0.5 | |
| | 5～11.11MΩ | | |

## 四、实验内容(experimental content)

1. 按实验室提供的电阻板、箱式电桥、导线按图 3-4-1 接好线路。

2. 根据待测电阻值，选择合理的倍率和电压，按操作要求分别(箱式惠斯通电桥的使用方法)测电阻板上 $R_{x1}$，$R_{x2}$，$R_{x3}$，$R_{x4}$的阻值，每个电阻只测一次，记下所选倍率和比较臂(测量盘示值)的值并记录到表 3-4-2 中。

3. 测量电桥灵敏度，在步骤 2 中(每次测量一个电阻后，紧接着测量电桥灵敏度)。测量电阻后，在电桥平衡状态下，按下“B”和“G”按钮，改变 $R_0$，使指针偏转 1 到 5DIV(格)，将此偏转格数 $\Delta n$ 和 $R_0$ 的改变量 $\Delta R_0$ 记下，填到表 3-4-2 中。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

表 3-4-2 用惠斯通电桥测电阻所测数据

| 待测电阻 | 倍率 $K_r$ $(R_1/R_2)$ | 测量盘示值 $R_0/\Omega$ | 计算电阻测量值 $R_x=K_rR_0/\Omega$ | 偏转格数 $\Delta n$ | $R_0$ 的改变量 $\Delta R_0$ | 灵敏度 $S=\dfrac{\Delta n}{\Delta R_0/R_0}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $R_{x1}$ | | | | | | |
| $R_{x2}$ | | | | | | |
| $R_{x3}$ | | | | | | |
| $R_{x4}$ | | | | | | |

### 2. 数据处理(data processing)

1）根据表 3-4-2 计算电阻 $R_x$ 的测量值和灵敏度 $S$。

2）计算每一组测量值的不确定度 $u_R=\dfrac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}}$，式中 $\Delta_{仪}=R_x\times$准确度等级 $K\%(\Omega)$。而 $K$

为量程倍率 $K_r$ 所对应的等级，由表 3-4-1 查出。

3）每一组测量值的最终结果表达式：$R_x = K_r \cdot R_0 \pm u_R(\Omega)$

## 六、注意事项（cautions）

1. 在用电桥测电阻前，先检查检流计是否调零，如未调零，应先调零后再开始测量。
2. $R_0$ 的第 1 测量盘（×1000）绝对不能调至"0"。
3. 在调节 $R_0$ 时，当检流计指针偏转到满刻度时，应立即松开按钮开关"B"和"G"。
4. 实验完毕后，应检查各按钮开关是否均已松开，再关闭电源；否则，将会损坏仪器。

## 七、思考题（exercises）

1. 惠斯通电桥有哪几部分组成？
2. 应怎样选择比率臂旋钮的倍率？若选择不当对结果有何影响？
3. 影响电桥灵敏度因素有哪些？

**关键词（key words）**

惠斯通电桥（Wheatstone bridge），电源（electrical source），电阻（resistance），检流计（galvanometer），倍率/比例系数（rate/proportion coefficient），灵敏度（sensitivity）

# 实验五　用电位差计测量电动势

电位差计是测量电动势或电势差的主要仪器之一，也用于间接测量电流、电阻和校准各种精密电表等。由于它应用了补偿原理和比较测量法，所以具有较高的精密度，使用也方便。在科学研究和工程技术中广泛使用电子电位差计进行自动控制和自动检测。通过学习电位差计实验，可以了解电位差计的基本原理、结构和使用方法。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 掌握补偿法测电位差计的工作原理与方法；
2. 学会用电位差计测量电动势。

## 二、实验原理(experimental principle)

### 1. 补偿原理(compensation principle)

在测量电源的电动势 $E_x$ 时，通常要将电压表并联在电源两端，如图 3-5-1 所示。由于电源内阻 $r$ 未知且不能忽略，则需考虑内阻 $r$ 上产生电压降 $Ir$，由闭合电路欧姆定律得

$$U_{CD} = E_x - Ir \tag{3-5-1}$$

可见，只有当 $I=0$ 时，电压表的读数才等于电源电动势的实际数值，即

$$U_{CD} = E_x \tag{3-5-2}$$

图 3-5-2 是补偿原理示意图，将被测电动势的电源 $E_x$ 和一个精确可调已知电动势的电源 $E_{CD}$ 并联，调节 $E_{CD}$ 使检流计 G 指零，即电流 $I=0$，$Ir=0$，$E_{CD}=E_x$。因为 $E_{CD}$ 是已知的，则 $E_x$ 亦可知，这时，电路达到了电压补偿，我们称这种测电动势的方法为补偿法。这种电路称为补偿电路。我们知道，用电压表测量电压时，总要从被测电路上分出一部分电流，从而改变了被测电路的状态，而用补偿电压时，补偿电路中没有电流，所以不影响被测电路的状态。这就是补偿测量法最大的优点和特点。

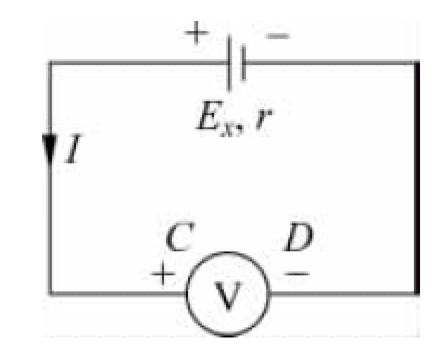



图 3-5-1　测量电源电动势

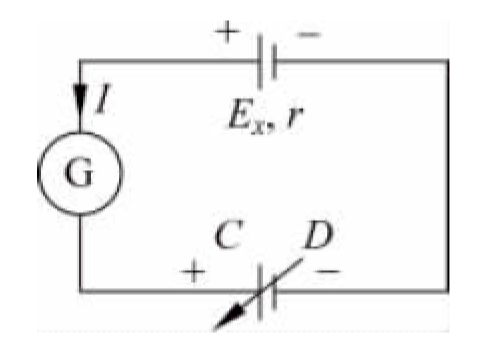



图 3-5-2　补偿原理

### 2. 电位差计的工作原理(principle of potentiometer)

电位差计就是按照补偿原理制成的测量电动势的仪器，其原理如图 3-5-3 所示。$E$ 是工作电源，$E_x$ 和 $E_S$ 分别是待测电源和标准电源，G 是检流计，$AB$ 是精密电阻 $R_{AB}$，触点 $C$，$C'$，$D$ 可在 $AB$ 上任意移动。整个电路分为三部分：一个工作回路($E-R-R_{AB}-E$)和两个补偿回路($E_S-R_{C'D}-G-E_S$)，($E_x-R_{CD}-G-E_x$)。

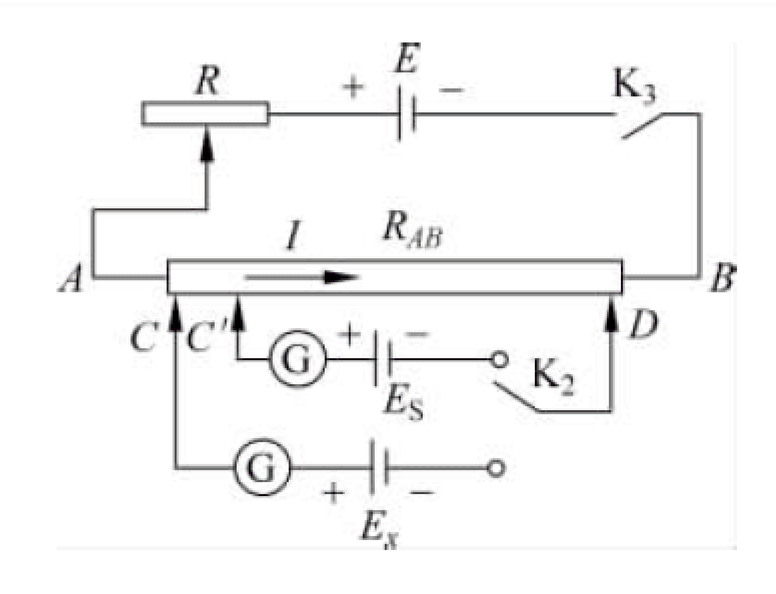



图 3-5-3 电位差计测电动势原理图

工作回路的作用是为补偿回路提供补偿电压，接通开关 $K_3$，调节可变电阻 $R$，使工作回路中有一定的工作电流 $I$；将开关 $K_2$ 打到 $E_x$ 接入端，调节 $C$，$D$ 两点，使检流计 G 的指针为零，即电路得到补偿，则有

$$E_x = U_{CD} = IR_{CD} \tag{3-5-3}$$

固定可变电阻 $R$，即保持工作电流 $I$ 不变；将开关 $K_2$ 打到 $E_S$ 接触端，用标准电源 $E_S$ 替换 $E_x$；调节 $C'$，$D$，使检流计 G 的指针为零，电路达到补偿状态；$C'$，$D$ 间的电压用 $U_{C'D}$ 表示则有

$$E_S = U_{C'D} = IR_{C'D} \tag{3-5-4}$$

将式(3-5-3)/式(3-5-4)，可得

$$\frac{E_x}{E_S} = \frac{U_{CD}}{U_{C'D}} \tag{3-5-5}$$

则有

$$E_x = \frac{U_{CD}}{U_{C'D}} E_S \tag{3-5-6}$$

由式(3-5-6)可知，若是 $E_S$ 已知，则只要测出 $U_{CD}$，$U_{C'D}$ 就可得到 $E_x$。由于这种结果是在同一工作电流 $I$ 下的 $E_x$ 与 $E_S$ 的补偿电压值 $U_{CD}$ 和 $U_{C'D}$ 进行比较得出的，所以此方法又称比较法。

**3. 校准工作电流(calibration working current)**

图 3-5-2 补偿原理中的 $E_{CD}$ 不但可调，而且要精确。这就要求在工作回路中流经 $AB$ 的精密电阻的电流必须严格符合精准稳定的要求，即仪器设计时要求的工作电流 $I$。所以用电位差计测出待测电动势 $E_x$ 之前，需要事先用标准电源的电动势 $E_S$ 来校准电位差计的工作电流 $I$。例如，测量温度为 20℃，查得标准电源的电动势为 1.0186V，则选标准电阻 $R_S$ 为 101.86Ω(调节接触点 $C'$，$D$)；接通开关 $K_3$，$K_2$ 打到 $E_S$ 接触端，调节可变电阻 $R$ 以改变工作电流的大小，直到检流计 G 的指针为零，即 $I_G=0$，显然，这时的工作电流为

$$I = \frac{E_S}{R_S} = \frac{1.0186}{101.86} = 0.010000(\mathrm{A})$$

工作电流校准后，若将开关 $K_2$ 打到 $E_x$ 接触端，调节接触点 $C$，$D$，使检流计 G 的指针为零，则可根据式 $E_x=U_{CD}$ 计算待测电动势 $E_x$。在实验中为使测量结果准确，应不时地校准工作电流。

## 三、实验仪器(experimental device)

标准电势和待测电势、87-1 型电位差计(type 87-1 potentiometer)。

87-1 型电位差计是教学专用仪器,其面板如图 3-5-4 所示。图中实线区域为电源和工作电流调节电路;短虚线区域为 $E_S$,$E_x$ 及其选择电路;长虚线区域为检流计电路;点线区域为读数电路。面板中电阻 $R_A$,$R_B$,$R_C$ 相当于图 3-5-3 中的 $R_{AB}$,所以 $B_A^+$ 和 $R^-$ 两个接头相应于图 3-5-3 中的 $AB$ 两点,$E^-$,$E^+$ 两个接头则相应于 $C$,$D$ 两点。$K_1$ 为电源开关,$K_2$ 可保持 $E_S$ 和 $E_x$ 相互迅速替换,$K_3$ 为本机电源开关,$K_4$ 是检流计的开关,$R_b$ 是可变电阻箱,用以保护检流计和标准电源。使用学生电位差计时,必须加外接电路。其中 $R_A$,$R_B$,$R_C$ 和外电路的检流计 G、保护电阻 $R_b$ 等组成补偿回路。$R_A$ 全电阻是 320Ω,分 16 挡,每挡 20Ω;$R_B$ 全电阻是 20Ω,分 10 挡,每挡 2Ω;$R_C$ 是滑线盘电阻,电阻值为 2.2Ω。本实验中标准电动势 $E_S$ 的准确度等级为 0.005 级,实际值:1.01855~1.01868V。

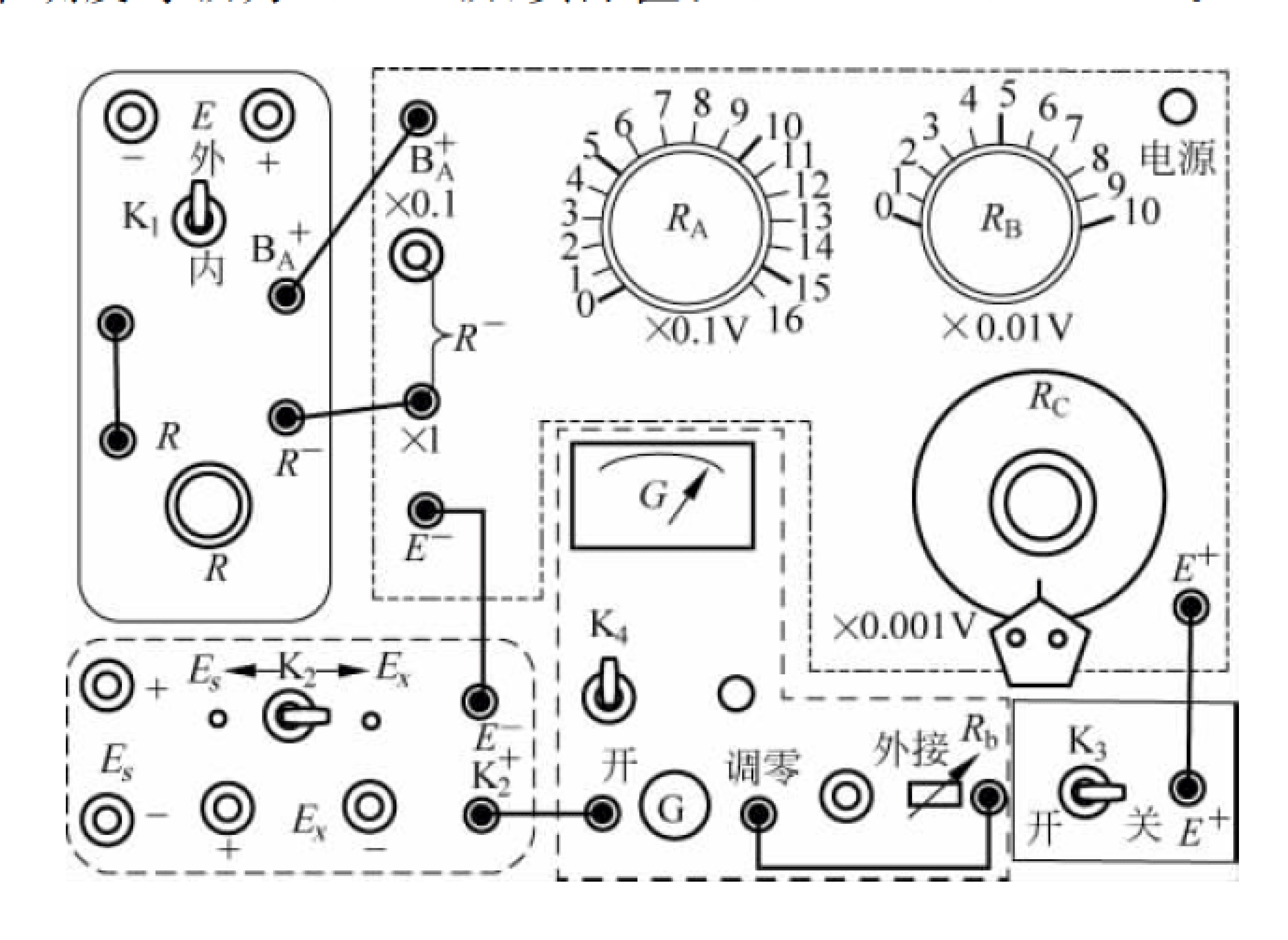



图 3-5-4　87-1 型电位差计面板示意图

## 四、实验内容(experimental content)

### 1. 准备工作(preparatory work)

(1) 按图 3-5-4 中的黑实线连接电路,另外再接入 $E_S$ 和 $E_x$,注意"+""−"极性。

(2) 开关功能及其设置如下:$K_1$ 倒向"内",使用本机内部电源;$K_2$ 位于中间,使用时间歇性地接通 $E_S$ 或 $E_x$;$K_3$ 倒向"开"即开通电源;$K_4$ 倒向"开",即接通检流计 G。

(3) 打开仪器电源开关,用"调零"旋钮调节检流计 G 的零点。

### 2. 校准工作电流(calibration of working current)

(1) 按标准电动势调整电阻旋钮为:$R_A=10$,$R_B=1$,$R_C=8.6$;$R_b$ 先取电阻箱的最大值,使用时如果检流计不稳定,可先将 $R_b$ 的阻值调小,直到检流计稳定为止(为了增加检流计的灵敏度,应逐步减小 $R_b$ 的阻值)。

（2）$K_2$ 间歇性地倒向 $E_S$ 一侧，同时调节 $R$，使检流计 G 在 $K_2$ 接通时也能指零，如此反复开、合 $K_2$，确认检流计中无电流流过时，此时工作电流 $I_0$ 已校准。切记：非校准时，不得旋动 $R$。

**3. 测量待测电源电动势（electromotive-force measurement of the power）**

（1）先调节被测电源电压为一给定近似值：0.3V，0.6V，0.9V，1.2V，1.5V。

（2）按待测电动势的近似值预先调好 $R_A$，$R_B$，$R_C$ 的值。

（3）$K_2$ 间歇性地倒向 $E_x$ 一侧，保持 $R$ 不变，微调 $R_A$，$R_B$，$R_C$ 的值，直到检流计 G 在 $K_2$ 接通时也能指零。

（4）记录 $R_A$，$R_B$，$R_C$ 的示值，即被测电源的电动势 $E_x$ 的值。关系式如下：

$$E_x = R_A\text{ 读数} \times 0.1 + R_B\text{ 读数} \times 0.01 + R_C\text{ 读数} \times 0.001$$

（5）重复“校准”和“测量”两个步骤，对 $E_x$ 各测量五次，并取其平均值作为测量结果。每次测量时均要校准工作电流。记录在表 3-5-1 中。

## 五、数据记录及处理（data recording and processing）

**1. 数据记录（data recording）**

**表 3-5-1　被测电源电动势测量数据**

| 次数 | $E_x$/V | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 1.5 |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 平均值 | | | | | |

**2. 数据处理（data processing）**

计算被测电动势的平均值，并算出其相对误差 $E_r$。

## 六、注意事项（cautions）

1. 电源及标准电池的正负极不能接错；经教师检查后方准接入电源。
2. 在测量未知电动势时，应保持工作电流不变。
3. 使用标准电池时应注意，通过或取自标准电池的电流不应大于 $10^{-5}$～$10^{-6}$A。
4. 不允许将两电极短路或用电压表测量其电动势。
5. 非测量时，随时关断开关 $K_4$；测量结束后，应将检流计 G 两端短路。

## 七、思考题(exercises)

1. 说明什么是补偿原理?
2. 用电位差计测量未知电动势总需要经过哪两步骤,为什么?
3. 电位差计使用前为何要进行校准,如何校准?
4. 测量时调节图 3-5-4 中的 $R$,也可使检流计 G 指零,为何不妥?

**关键词(key words)**

电位差计(potentiometer),电源(electrical source),电动势(electromotive force),电阻(resistance),补偿法(compensation method),检流计(galvanometer)

# 实验六　电表改装与校正

表头通常是一只磁电式微安表，它只允许通过微安级的电流，一般只能测量很小的电流和电压。如果要用它来测量较大的电流或电压，就必须进行改装，以扩大其量程。经过改装后的微安表具有可测量较大电流、电压等多种用途。通过该实验的学习不但能使学生了解磁电式直流安培计和伏特计的结构和测量原理，而且使学生学会电表扩大量程的改装方法，以及如何对电表进行校准。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 理解电表改装与校正的原理；
2. 掌握将 1mA 表头改成较大量程的电流表和电压表的正确方法；
3. 了解电表的准确度等级的含义。

## 二、实验原理（experimental principle）

用于改装的微（毫）安表习惯上称为“表头”，使微（毫）安表指针偏转到满度所需最大电流称为表头的量程，用 $I_g$ 表示。$I_g$ 越小，微（毫）安表的灵敏度就越高。微（毫）安表内线圈的电阻称为表头内阻，用 $R_g$ 表示。微（毫）安表的量程很小，一般都需要通过并联或串联电阻来扩大电流或电压的量程。常用的直流电流表和电压表都是由微（毫）安表改装的，因此微（毫）安表是直流电表的核心，电表的准确度主要取决于微（毫）安表。

### 1. 替代法测表头内阻 $R_g$（determining internal resistance of gauge head using substitution method）

图 3-6-1 所示是测量表头内阻的原理图。微（毫）安表接入电路中，调节电源电压及电阻 $R_W$ 使毫安表指针指到满偏，记下标准电流表的读数；保持电源电压及 $R_W$ 不变，用电阻箱 $R_2$ 代替毫安电流表，调节 $R_2$ 使标准电流表的读数不变，此时电阻箱 $R_2$ 的电阻值即为表头内阻 $R_g$。

### 2. 将微安表头改装成电流表（changing microampere into amperemeter）

改装原理详见图 3-6-2 所示。当测量较大电流时，需要扩大电表的电流量程，则在微（毫）安表两端并联电阻 $R_S$，使超过微（毫）安表所能承受的那部分电流从 $R_S$ 流过，则由微（毫）安表和电阻 $R_S$ 组成的部分就是电流表或安培表（图中虚线框部分），电阻 $R_S$ 称为分流电阻。选用不同的电阻 $R_S$ 可以得到不同量程的电流表，只需对改装表的表盘重新刻度电流值，就可以用此表测量较大的电流。

设改装后所测电流的量程为 $I$，根据欧姆定律有

$$I_g R_g = (I - I_g) R_S$$

变换得

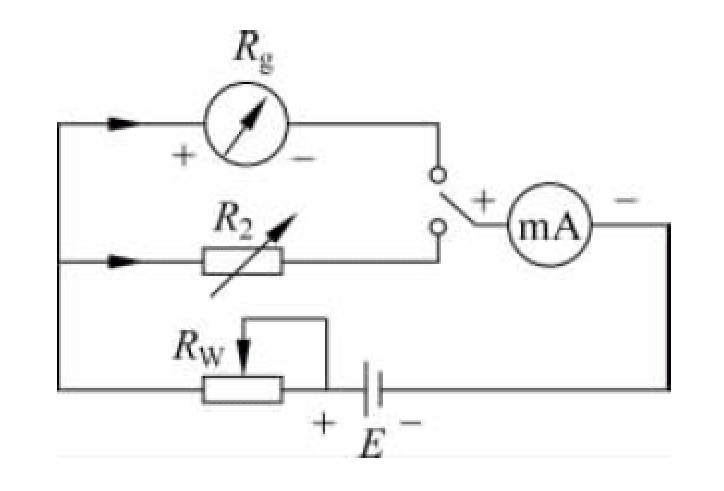



图 3-6-1 替代法测量表头内阻

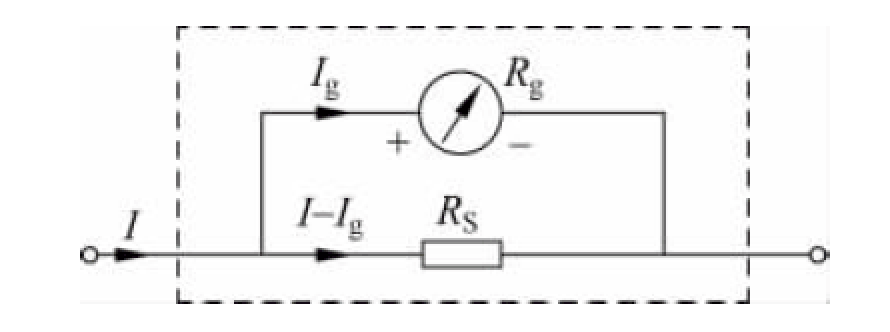



图 3-6-2 改装电流表原理图

$$R_S = \frac{I_g R_g}{I - I_g} = \frac{R_g}{\frac{I}{I_g} - 1} = \frac{R_g}{n-1} \tag{3-6-1}$$

式中，$n=\frac{I}{I_g}$为电流量程的扩大倍数。因此，若要将微（毫）安表的量程扩大为原来量程的 $n$ 倍，只需在微（毫）安表上并联一个阻值为 $R_S=\frac{R_g}{n-1}$的分流电阻。改装表的量程越大，则并联的分流电阻 $R_S$ 就越小，改装后电流表的内阻为微（毫）安表内阻 $R_g$ 与分流电阻 $R_S$ 的并联值，因此量程越大，内阻越小。

**3. 将微安表改装成电压表（changing microampere into voltmeter）**

微（毫）安表能够测量的电压很低，满刻度的量程也只有零点几伏，不能满足需要。为了能测量较大电压，需在微（毫）安表上串联一个分压电阻 $R_H$，使超过微（毫）安表所能承受的那部分电压降落在电阻 $R_H$ 上，而微（毫）安表上的电压降仍为原来的 $I_gR_g$，原理详见图 3-6-3 所示。选用不同的电阻 $R_H$ 可以得到不同量程的电压表。

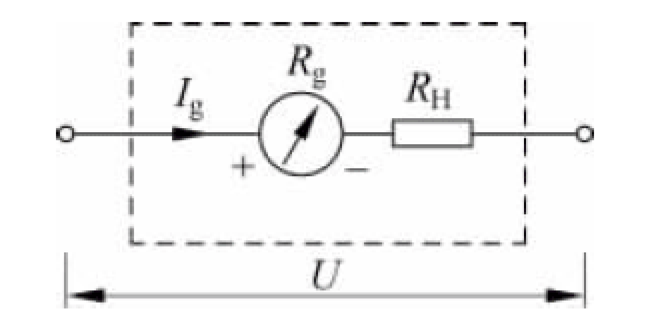



图 3-6-3 改装电压表原理图

设改装后所测电压的量程为 $U$，根据欧姆定律可有

$$U = I_gR_g + I_gR_H$$

变换得到

$$R_H = \frac{U}{I_g} - R_g \tag{3-6-2}$$

因此，若要将微（毫）安表的量程改装为量程是 $U$ 的电压表，只需在微（毫）安表上串联一个阻值为 $R_H=\frac{U}{I_g}-R_g$ 的分压电阻。改装后的电压表的内阻为 $R_g+R_H$，由式（3-6-2）可知，改装后电压表的内阻与电压量程 $U$ 成正比，量程越大，则电压表内阻越大，所串联的分压电阻 $R_H$ 也越大。

**4. 校准改装表（calibrating refitted electric meter）**

经过改装后的电表要进行校准，即将改装表与一个准确度较高（一般要比改装表的准确度高两级）的标准表进行比较，分别校准改装表的量程和刻度。对刻度的校准应选择改装表中各个刻度值（本实验只要求整刻度）作为校准点，得到各指示位置的绝对误差并做出改装表的校准曲线。

根据改装表的校准曲线可以确定改装表的准确度等级，可以修正改装表的读数值以得到较准确的结果。找出校准结果中最大的绝对误差，可以标定电表的准确度等级（确定方法见第 56 页附注）。

## 三、实验仪器（experimental device）

DH4508 型电表改装与校准实验仪、连接线等。

DH4508 型电表改装与校准实验仪面板结构示意图如图 3-6-4 所示，内部附有指针式电流计、标准电压表、标准电流表、可调直流稳压电源、十进式电阻箱、专用导线及其他部件。其中，可调直流稳压源分为 2V，10V 两个量程，通过“电压选择开关”选择所需的电压输出，调节“电压调节”电位器调节需要的电压。标准数显电压表有 2V，20V 两个量程，通过“电压量程选择开关”选择不同的电压量程，需连接到对应的测量端方可测量。标准数显电流表有 2mA，20mA 两个量程，通过“电流量程选择开关”选择不同的电流量程，需连接到对应的测量端方可测量。$R_W$ 是电位器，$R_1$，$R_2$ 是电阻器，阻值范围是 0～11111.0Ω，精度 0.1 级。

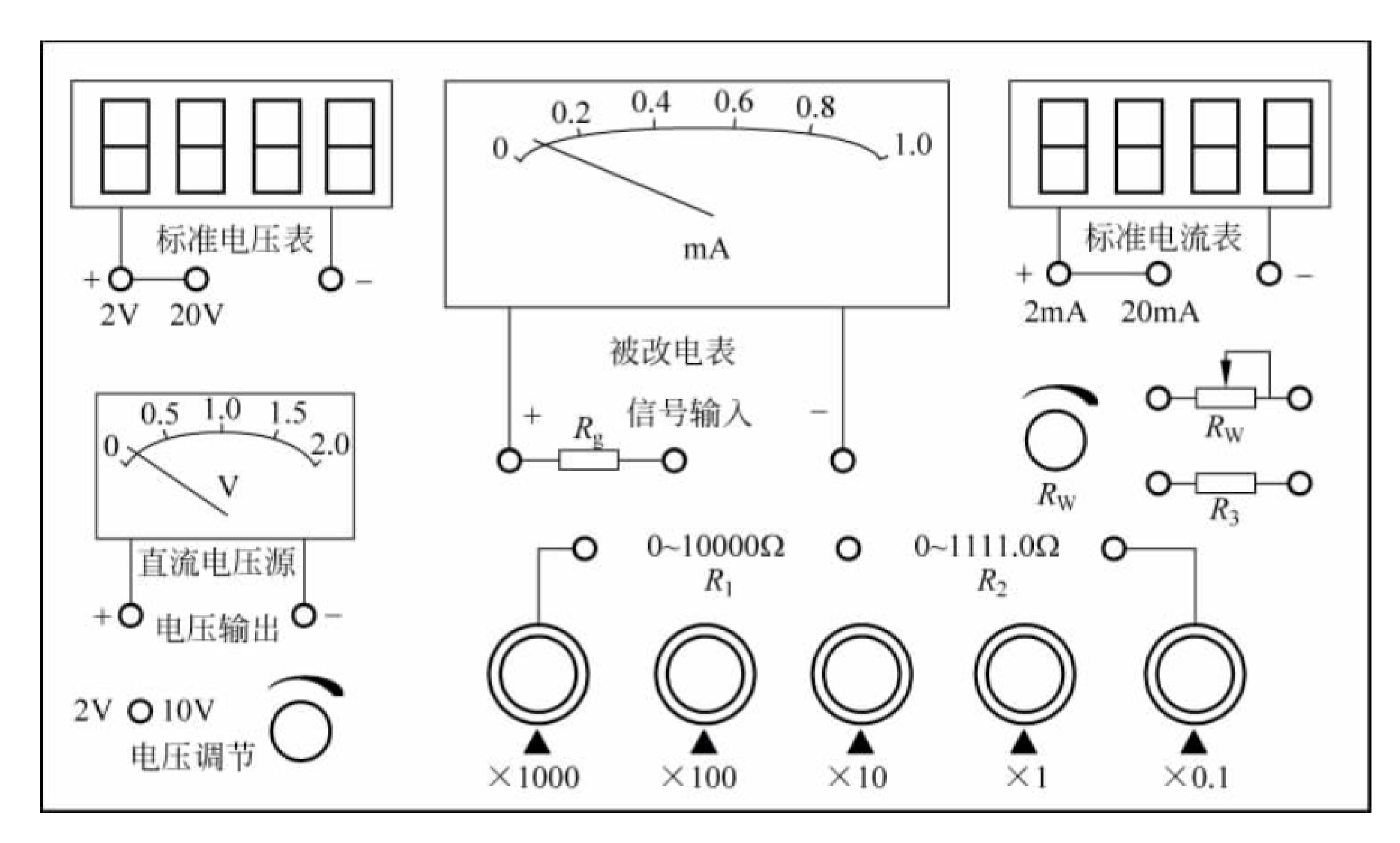



图 3-6-4　DH4508 型电表改装与校准实验仪面板示意图

## 四、实验内容（experimental content）

### 1. 用替代法测表头内阻 $R_g$

（1）按图 3-6-1 连接好电路，标准电流表选择 2mA 量程，并与表头串联。

（2）接通电源，粗调电源电压和微调变阻器 $R_W$，使表头指针偏转至满刻度，记录此时标准电流表的读数 $I_g$。

（3）保持电源电压和变阻器 $R_W$ 不变，用电阻 $R_2$ 替换表头（即标准电流表与 $R_2$ 串联）。

（4）调节电阻 $R_2$ 使标准电流表的读数仍为 $I_g$，此时 $R_g=R_2$。

**2. 将表头(量程 $I_g=1\text{mA}$)改装成量程为 $I=5\text{mA}$ 的电流表,并校准**

(1) 根据表头量程 $I_g$ 和内阻 $R_g$ 及改装后电流表的量程 $I$,按公式(3-6-1)$R_S=\dfrac{R_g}{n-1}$计算出分流电阻 $R_S$ 的理论值,并将电阻箱预先调到理论值 $R_S$,则 $R_2=R_S$。

(2) 将电源调到最小,变阻器 $R_W$ 调到中间位置,按图 3-6-5 连接好电路图,标准电流表选择 20mA 量程。

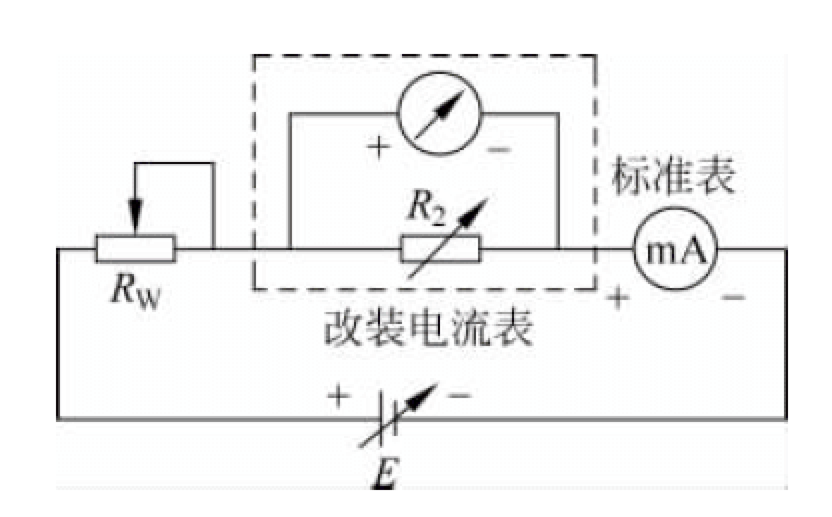


图 3-6-5 改装电流表

(3) 调零点:接线不变,必要时,先调好标准表和改装表的机械零点,然后校准改装表的量程。

(4) 校准量程:将标准电流表量程定为 20mA,慢慢粗调电源,使电压缓慢升高,根据需要可以配合调节变阻器 $R_W$(注意:$R_W$ 作为限流电阻,阻值不要调到最小值),使改装电流表指针正好指到满量程,记录下此时标准表的读数。然后调小电源电压(注意:此时保持 $R_W$ 不变),使改装表电流由 5mA 逐步减小至 0.0mA,此过程中每减小 1mA(改装表满度的 1/5)记录一次标准表的电流读数;改装表电流减小至 0.0mA 后,再调节电源,升高电压,仍按原来 1mA 的间隔逐步增大改装表的电流到满量程 5mA,并记录标准表电流的相应读数。将测量数据填入表 3-6-1。

(5) 做校准曲线:以改装表读数 $I_{改}$ 为横坐标,标准表由大到小及由小到大调节时两次读数的平均值 $\bar{I}_{标}$ 为纵坐标,在坐标纸上做出电流表的校准曲线。根据改装表和标准表的对应值,算出修正值 $\Delta I=I_{改}-\bar{I}_{标}$,根据两表的最大修正值 $\Delta I$ 确定改装表的准确度等级(详见第 56 页附注“改装表的准确度等级”)。

**3. 将表头(量程 $I_g=1\text{mA}$)的毫安表改装成量程为 $U=1.5\text{V}$ 的电压表,并校准**

(1) 根据表头量程 $I_g$ 和内阻 $R_g$ 及改装电压表的量程 $U$,按公式(3-6-2)$R_H=\dfrac{U}{I_g}-R_g$ 计算出分压电阻 $R_H$ 的理论值,将电阻箱 $R_1$、$R_2$ 预先调到理论值 $R_H$,即 $R_1+R_2=R_H$。

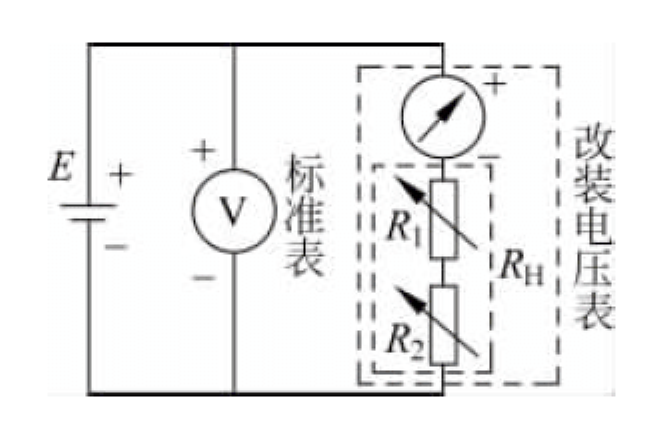


图 3-6-6 改装电压表

(2) 按图 3-6-6 连接好电路图,标准电压表选择 2V 量程。

(3) 调零点:接线不变,必要时,先调好标准表和改装表的机械零点,然后校准改装表的量程。

(4) 校准量程:将标准电压表量程定为 2V;慢慢粗调电源,使电压缓慢升高,使改装电流表指针正好指到满量程(1.5V),记录此时标准表的读数;然后调小电源电压,使改装表电压读数由 1.5V 逐步减小到零,此过程中每减小 0.3V(改装表满度的 1/5)记录一次标准表的电压读数;改装表电压减小至 0.0V 后,再调节电源,升高电压,仍按原来 0.3V 的间隔逐步增大改装表的电压直到满量程 1.5V,并记录标准表电压的相应读数。将测量数据填入表 3-6-2。

(5) 做校准曲线:以改装表读数 $U_{改}$ 为横坐标、标准表由大到小及由小到大调节时两次读数的平均值 $\bar{U}_{标}$ 为纵坐标,在坐标纸上做出电压表的校准曲线。根据改装表和标准表的对应值,算出修正值 $\Delta U=U_{改}-\bar{U}_{标}$,根据两表的最大修正值 $\Delta U$ 确定改装表的准确度等级(详见第 56 页附注“改装表的准确度等级”)。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

1) 表头的内阻和电流:$I_g$=________ A,$R_g$=________ Ω

2) 改装电流表的实验数据

表 3-6-1 电流表校正实验数据　　$R_2$=________ Ω

| 改装表读数 $I_{改}$/mA | 标准表电流读数/mA | | | 示值误差 $\Delta I$/mA |
|---|---|---|---|---|
| | 减小时 | 增大时 | 平均值 $\bar{I}_{标}$ | |
| 0 | | | | |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

3) 改装电压表的实验数据

表 3-6-2 电压表校正实验数据　　$R_H$=________ Ω

| 改装表读数 $U_{改}$/V | 标准表电压读数/V | | | 示值误差 $\Delta U$/V |
|---|---|---|---|---|
| | 减小时 | 增大时 | 平均值 $\bar{U}_{标}$ | |
| 0 | | | | |
| 0.3 | | | | |
| 0.6 | | | | |
| 0.9 | | | | |
| 1.2 | | | | |
| 1.5 | | | | |

### 2. 数据处理(data processing)

1) 完成上述表格,并分别算出改装后电流表与电压表的示值误差。

2) 根据最大示值误差,做出误差曲线 $\Delta I$-$I$,$\Delta U$-$U$。

3) 分别算出改装后电流表和电压表的准确度等级。

## 六、注意事项(cautions)

1. 经教师检查后方可接入电源;
2. 注意正负极不能接反。

## 七、思考题(exercises)

1. 将毫安表改装成电流表后,若发现改装表的读数比标准表的读数偏高,请说明原因;要使改装表的读数达到标准表的读数,应如何调节分流电阻?

2. 将毫安表改装成电压表后，若发现改装表的读数比标准表的读数偏高，改装表的分压电阻应如何调整？

3. 作校准曲线有何意义？

**关键词(key words)**

电表改装(modification of electric meters)，准确度等级(degree of accuracy)，电流(current)，电流表(current meter)，电压表(voltmeter)，误差(error)，校准(adjusting)

**附注**

**改装表准确度等级**

**1. 电表的准确度**

根据国家规定，我国生产的电表准确度分为7级，即0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0。电表正常工作时，可能出现的最大仪器误差 $\Delta N_m$ 与量程 $N_m$ 比值的百分数，称为电表的准确度，用 $K$ 表示，即

$$K\% = \frac{\Delta N_m}{N_m} \times 100\%$$

电表准确度的等级越小，准确度越高，表示电表的误差越小。电表测量时可能出现的最大误差，就是电表的误差限，即

$$\Delta_{仪} = \Delta N_m = \pm K\% \cdot N_m$$

如准确度为0.5级，量程为5A的电表，其误差限为

$$\Delta_{仪} = \pm K\% \cdot N_m = 0.005 \times 5 = 0.025(\text{A})$$

**2. 改装表准确度等级**

以改装电流表为例。实验中，将改装表与标准表比较后存在的最大误差为 $\Delta I_{改}$；标准表也并非绝对准确，其误差限为 $\Delta I_{标}$（即 $\Delta_{仪}$）。所以，对改装表来说，考虑到最大误差的情况，最大误差应为 $|\Delta I_{改}| + \Delta I_{标}$。因此，改装表的准确度等级应为

$$K\% = \frac{|\Delta I_{改}| + \Delta I_{标}}{改装表量程} \times 100\%$$

例如本实验中，对于电流表：

标准表的误差限：$\Delta I_{标} = 20 \times 0.5\% = 0.10(\text{mA})$

改装表等级为：$K\% = \dfrac{|\Delta I_{改}| + \Delta I_{标}}{改装表量程} \times 100\% = \dfrac{|\Delta I_{改}| + 0.10}{5\text{mA}} \times 100\%$

对于电压表：

标准表的误差限：$\Delta U_{标} = 2.0 \times 0.5\% = 0.010(\text{V})$

改装表等级为：$K\% = \dfrac{|\Delta U_{改}| + \Delta U_{标}}{改装表量程} \times 100\% = \dfrac{|\Delta U_{标}| + 0.010}{1.5\text{V}} \times 100\%$

**注意：** 若计算得到改装表的准确度等级 $K$ 的值刚好在国家规定的电表准确度等级的7个级别中某两级之间，则取大不取小。比如计算得到 $K=1.9$，则 $K$ 取2.5级。

# 实验七　磁悬浮动力学实验

随着科技的发展,磁悬浮技术的应用成为技术进步的热点,例如磁悬浮列车。本实验应用永磁悬浮技术,在磁悬导轨与滑块两组带状磁场的相互作用的斥力下,使磁性滑块悬浮起来,从而减少了运动的阻力,来进行多种力学实验,比如探索牛顿第二定律、验证动量守恒定律及机械能守恒定律等。通过实验,学生可以接触到磁悬浮的物理思想和技术,拓宽知识面,加深对运动学和动力学方面知识的理解和认识。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 学会磁悬浮导轨、智能速度测试仪的调节和使用;
2. 学会在磁悬浮导轨上测定物体运动的速度与加速度,并验证牛顿第二定律;
3. 通过碰撞实验,验证动量守恒定律及机械能守恒定律。

## 二、实验原理(experimental principle)

本实验使用的永磁悬浮技术,是在磁悬导轨与滑块两组带状磁场的相互作用的斥力下,使磁性滑块悬浮起来,从而减少了运动的阻力,可进行近似无阻力的力学实验。

### 1. 速度的测量(measurement of speed)

在水平导轨上悬浮的物体(滑块)所受的合外力为零,则物体可以静止或作匀速直线运动。力学中,物体作匀速直线运动的平均速度为

$$\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

当 $\Delta t\to 0$ 时,平均速度趋于一个极限,可得运动物体的瞬时速度,即速度

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta x}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\bar{v}$$

实验中,直接用这种办法测定某点的瞬时速度是很困难的,但是在一定的误差范围内,在运动物体上取一小段长度 $\Delta x$,测定其经过某点的时间间隔 $\Delta t$,由于 $\Delta x$ 和 $\Delta t$ 都足够的小,就可以用其平均速度近似表示瞬时速度。本实验中就是通过这一原理,利用滑块(物体)上的遮光片配合智能测速仪来测定运动物体的速度。

### 2. 加速度的测量(measurement of acceleration)

如图 3-7-1 所示,已知斜面与水平面的倾角为 $\alpha$,在忽略阻力的情况下,静止于斜面顶端的滑块(质量为 $m$)将沿斜面作匀加速直线运动,根据牛顿第二定律 $F=ma$,滑块沿斜面下滑的加速度的大小为

$$a=\frac{F}{m}=\frac{mg\sin\alpha}{m}=g\sin\alpha \qquad (3\text{-}7\text{-}1)$$

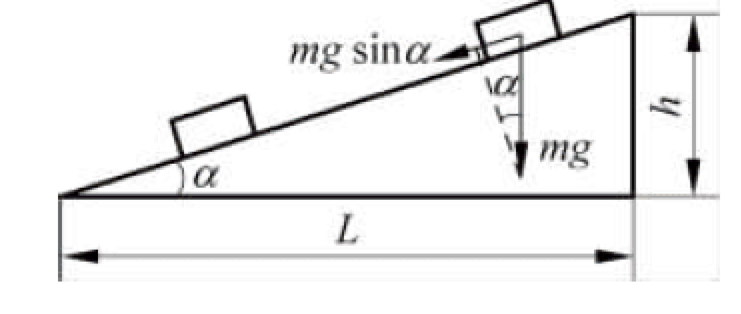


图 3-7-1　模拟斜面运动

当 $\alpha$ 很小时,有 $\sin\alpha\approx\tan\alpha=\dfrac{h}{L}$,则

$$a = g\frac{h}{L} \tag{3-7-2}$$

式中 $g$ 为重力加速度，$L$ 为斜面底边的长度，$h$ 为斜面的高度。

由于滑块作匀加速直线运动，则加速度 $a$ 与位移 $s$ 的关系为

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s} \tag{3-7-3}$$

实验中，分别测定滑块通过第一光电门的速度大小 $v_1$、通过第二光电门的速度大小 $v_2$ 及两光电门间的距离 $s$，利用式(3-7-3)可以求出加速度。

**3. 验证动量守恒与机械能守恒定律(verification of Law of conservation of momentum and conservation of mechanical energy)**

若有一系统不受外力的作用，或所受合外力为零时，则系统的动量保持不变，即系统的动量守恒。本实验中，利用磁悬浮技术，使得滑块在导轨上悬浮，合外力及摩擦力可忽略不计，符合动量守恒的条件。

如图 3-7-2 所示，设同一水平面上两物体的质量分别为 $m_1$，$m_2$，并发生完全弹性碰撞。分别测得两物体碰撞前的速度大小分别为 $v_{10}$，$v_{20}$，两物体碰撞后的速度大小分别为 $v_1$，$v_2$，则系统碰撞前的动量 $p_0 = m_1v_{10} + m_2v_{20}$；碰撞后的动量 $p_1 = m_1v_1 + m_2v_2$，比较系统碰撞前后的动量，若 $p_0 = p$，则系统动量守恒。即

图 3-7-2 碰撞示意图

$$m_1v_{10} + m_2v_{20} = m_1v_1 + m_2v_2 \tag{3-7-4}$$

由于两物体在同一水平面上作弹性碰撞，机械能只有动能，碰撞前系统的动能 $E_0 = \frac{1}{2}m_1v_{10}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{20}^2$，碰撞后系统的动能 $E = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2$。若 $E_0 = E$，则可验证系统机械能守恒。即

$$\frac{1}{2}m_1v_{10}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{20}^2 = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \tag{3-7-5}$$

由式(3-7-4)和式(3-7-5)亦可得

$$\begin{cases} v_1 = \dfrac{(m_1 - m_2)v_{10} + 2m_2v_{20}}{m_1 + m_2} \\ v_2 = \dfrac{(m_2 - m_1)v_{20} + 2m_1v_{10}}{m_1 + m_2} \end{cases} \tag{3-7-6}$$

讨论：当 $m_1 \neq m_2$，且 $v_{20} = 0$ 时，有

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}v_{10}, \quad v_2 = \frac{2m_1v_{10}}{m_1 + m_2} \tag{3-7-7}$$

当 $m_1 = m_2$，且 $v_{20} = 0$ 时，有

$$v_1 = 0, \quad v_2 = v_{10} \tag{3-7-8}$$

结果表明，质量相同的两物体经过碰撞后将交换彼此的速度。

## 三、实验仪器(experimental device)

磁悬浮导轨、智能测试仪、滑块、米尺、电子天平、水准仪等。

DHSY-1 型磁悬浮动力学实验仪使用说明如下：

磁悬浮实验装置如图 3-7-3 所示，磁悬浮导轨实际上是一个槽轨，长约1.2m，在槽轨底部中心轴线嵌入钕铁硼 NdFeB 磁钢，在其上方的滑块底部也嵌入磁钢，形成两组带状磁场。由于磁场极性相反，上下之间产生斥力，滑块处于平衡状态。为使滑块悬浮在导轨上运行，采用了槽轨。导轨的基板上安装了带有角度刻度的标尺。根据实验要求，抬动导轨一端的手柄可将导轨设置成不同角度的斜面(倾斜角分别为 1°,2°,3°)。

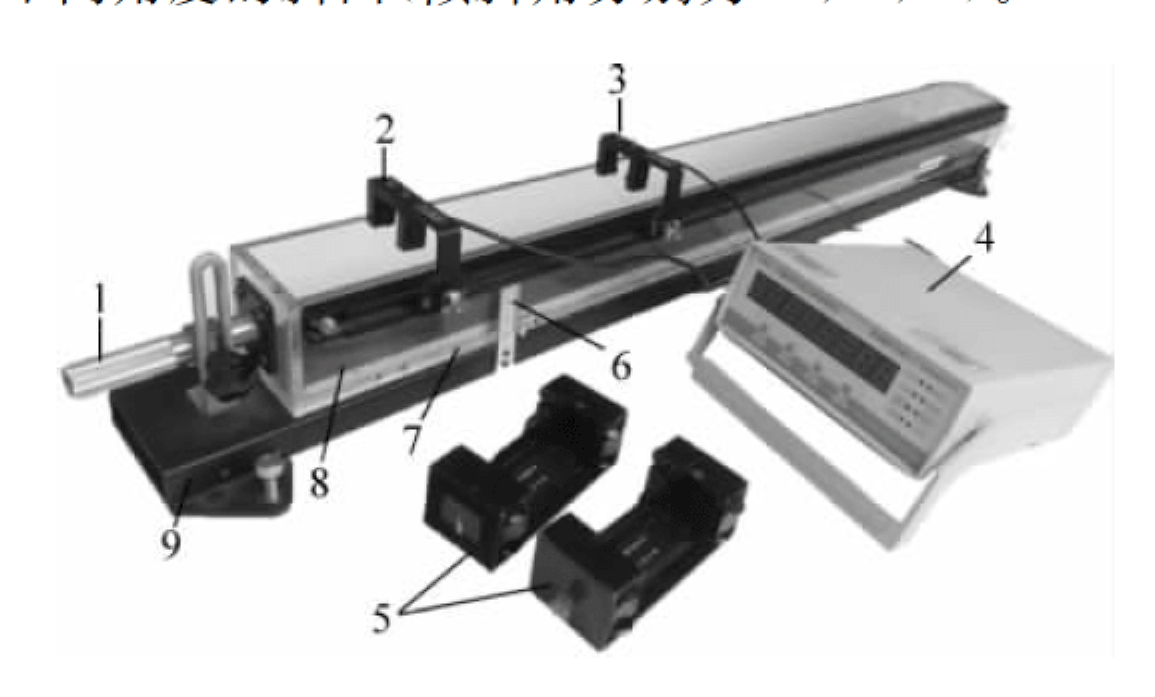



图 3-7-3　磁悬浮实验装置

1—手柄；2—光电门Ⅰ；3—光电门Ⅱ；4—智能测试仪；5—磁浮滑块导轨；6—角度尺；7—标尺；8—导轨；9—基板

实验约定：加速度测量时首先经过的光电门定为光电门Ⅰ；碰撞测量时 $A$ 小车位于 $B$ 小车左侧，将导轨左侧光电门定为光电门Ⅰ。

DHSY-1 型磁悬浮导轨实验智能测试仪是根据磁悬浮导轨实验专门设计研制的实验装置，测试仪基于微控制器嵌入式设计，具有测量精度高、读数清晰、使用方便等特点。智能测试仪的面板如图 3-7-4 所示，各个按钮的功能如下：

$t_1$：滑块通过第一光电门的时间间隔；$t_2$：滑块通过第二光电门的时间间隔；$t_3$：运动滑块从第一光电门到第二光电门所经历的时间间隔。$v_1$：滑块通过第一光电门时的平均速度；$v_2$：滑块通过第二光电门时的平均速度；$a$：加速度。

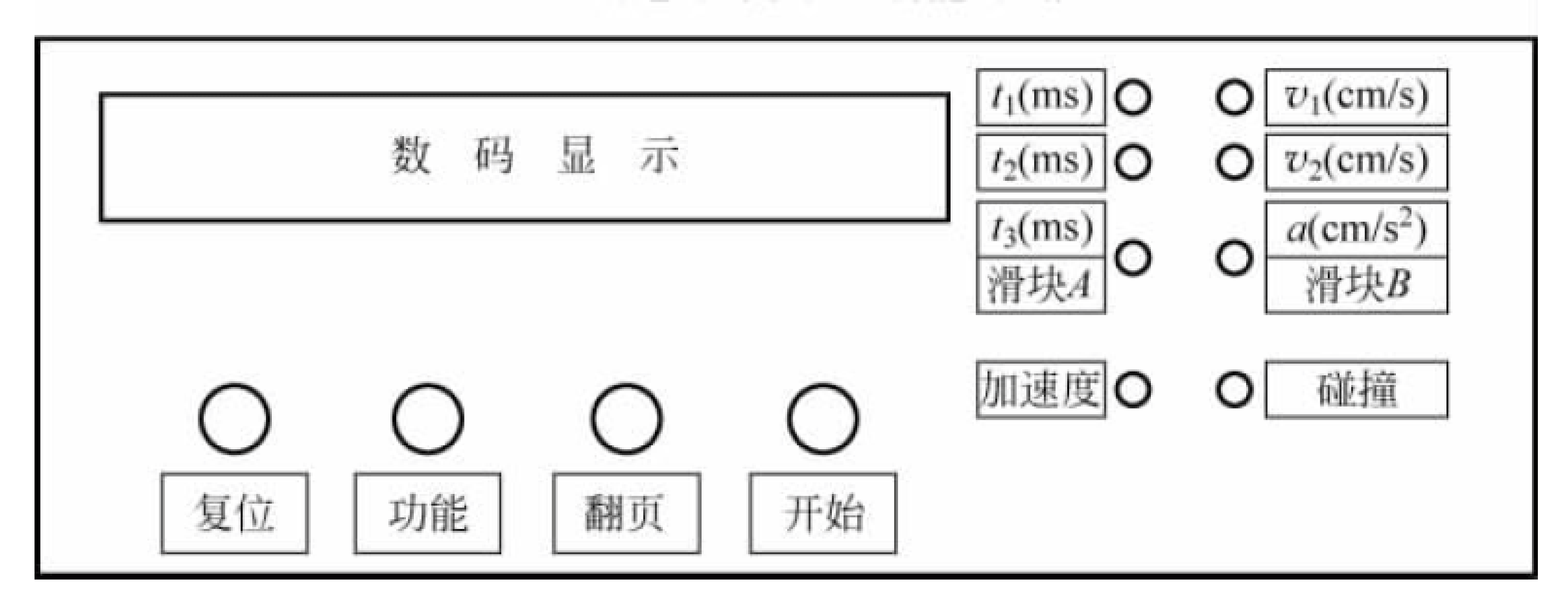



图 3-7-4　智能测试仪外观示意图

**1. 加速度测量**

(1) 按“功能”按钮，选择工作模式。如选择加速度模式，则“加速度”指示灯亮(智能测试仪开始处于“加速度”功能)。

(2) 按“翻页”按钮,可选择需存储的组号或查看各组数据。最高位数码管显示“0～9”,表示存储的组号。

(3) 按“开始”按钮,即开始一次加速度测量过程,测量结束后数据会自动保存在当前组中。

(4) 测量数据依次显示顺序:$t_1 \rightarrow v_1 \rightarrow t_2 \rightarrow v_2 \rightarrow t_3 \rightarrow a$,对应的指示灯会依次亮,每个数据显示时间为 2s。

(5) 清除所有数据按“复位”按钮。

**2. 碰撞测量**

(1) 按“功能”按钮,选择工作模式,当‘碰撞’指示灯亮(等待约 30s)时,按下“开始”按钮,即选择碰撞模式。

(2) 按“开始”按钮,即开始一次碰撞测量过程,测量结束后数据会自动保存在当前组中;

(3) 测量数据依次显示顺序:$A$:$t_1 \rightarrow v_1 \rightarrow t_2 \rightarrow v_2$;$B$:$t_1 \rightarrow v_1 \rightarrow t_2 \rightarrow v_2$,对应的指示灯会依次亮,每个数据显示时间 2s。

## 四、实验内容(experimental content)

1. 调整好磁悬浮导轨呈水平位置;调整两光电门间保持适当的距离,其时间间隔应使毫秒计来得及复位和读数;实验中所测滑块通过光电门的时间、滑块的速度、加速度均由智能测试仪自动记录与显示。

2. 速度的测定

将滑块置于两光电门之外如图 3-7-5 所示,轻推滑块,分别记录滑块上的挡光片经过两光电门时的时间间隔 $t_1$,$t_2$(即相应的 $\Delta t$)及速度 $v_1$,$v_2$,数据记录到表 3-7-1 中,测量 3 次,并进行比较。当滑块通过光电门 2 后要对滑块制动,以免其又返回光电门 2,干扰测量,影响测量结果的准确性。




图 3-7-5 速度测量示意图

3. 加速度的测定

1) 调整磁悬浮导轨呈倾斜位置,斜面的倾斜角为 3°;用米尺测出两光电门间的距离 $s$;将滑块置于斜面最高处并使其自由下滑,分别记录滑块经过两光电门时的时间间隔 $t_1$,$t_2$ 及速度 $v_1$,$v_2$,智能测试仪的加速度 $a$。将数据记录到表 3-7-2 中,测量 3 次。

2) 将光电门 2 在斜面上从上到下依次设置 5 个不同位置,使滑块从斜面顶端(注意:必须是同一个位置)由静止自由下滑,分别记录滑块通过两光电门的时间间隔 $t$(由测试仪的 $t_3$ 显示)及速度(只记录测试仪的 $v_2$),实验数据填入表 3-7-3 中,各测 3 次取平均值。以时间 $t$ 为横坐标,速度 $v$ 为纵坐标,用所得平均值在坐标纸上做 $v$-$t$ 曲线,并算出斜率。

4. 验证动量守恒与机械能守恒(完全弹性碰撞)

1) 相同质量两滑块碰撞

(1) 选取质量相等的两滑块 $A$ 和 $B$,用电子天平称量出其质量分别为 $m_1$,$m_2$。

(2) 调整好磁悬浮导轨呈水平位置;智能测试仪面板“功能”调整为“碰撞”模式。

(3) 将滑块 $B$ 静止(即 $v_{20}=0$)地置于两光电门之间靠近光电门 2 一侧处,如图 3-7-6 所示;将滑块 $A$ 放置于两光电门之外,触动“开始”键后,从两光电门之外将滑块 $A$ 轻推向滑块 $B$ 运动。滑块 $B$ 通过光电门 2 后要及时手动制动,以免其又返回光电门 2,干扰测量。

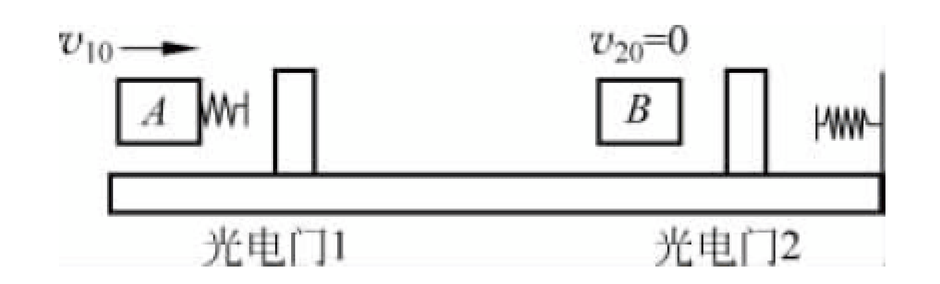



图 3-7-6 相同质量两滑块碰撞示意图

(4) 读取并记录智能测试仪上滑块 $A$ 通过光电门 1 的速度 $v_{10}$、两滑块碰撞后分别通过光电门 2 的速度 $v_1$,$v_2$。测量 3 次,结果记录到表 3-7-4 中。

(5) 由实验结果根据公式(3-7-4)判断是否动量守恒。结果代入公式(3-7-5)还可得到两滑块动能之比 $N=\dfrac{\frac{1}{2}m_1v_{10}^2+\frac{1}{2}m_2v_{20}^2}{\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2}$,并判断是否机械能守恒。

2) 不同质量两滑块的碰撞

(1) 取三个滑块,将其中两个用尼龙搭扣接在一起作为滑块 $A$,第三个滑块作为滑块 $B$,用电子天平分别称量其质量 $m_1$,$m_2$,$m_3$。

(2) 滑块 $A$ 置于光电门 1 外,滑块 $B$ 静止地置于两光电门内靠近光电门 2 一侧处如图 3-7-7 所示;将滑块 $A$ 用手推动给予一定的速度向滑块 $B$ 运动。两滑块通过光电门 2 后均要及时手动制动。

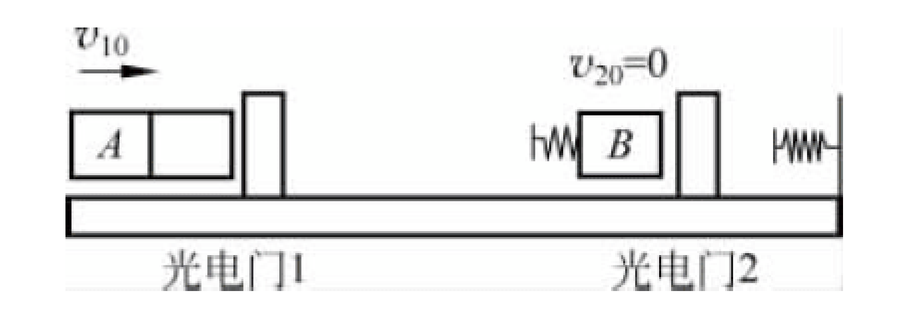



图 3-7-7 不同质量两滑块的碰撞示意图

(3) 记录滑块 $A$ 通过光电门 1 的速度 $v_{10}$、两滑块碰撞后分别通过光电门 2 的速度 $v_1$,$v_2$。测量 3 次,结果记录于表 3-7-5 中。

(4) 按 1)中步骤(5)的要求判断是否动量守恒和机械能守恒。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

(1) 滑块匀速直线运动速度的测量

表 3-7-1 速度的测量(测试仪显示的 $t$ 均为时间间隔)

| 次数 | 滑块匀速直线运动 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $t_1$/s | $t_2$/s | $v_1$/(cm・s$^{-1}$) | $v_2$/(cm・s$^{-1}$) | $(v_2-v_1)$/(cm・s$^{-1}$) |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |

(2) 滑块沿斜面下滑加速度的测量

表 3-7-2 滑块加速度的测定

| 次数 | $t_1$/s | $t_2$/s | $v_1$/(cm・s$^{-1}$) | $v_2$/(cm・s$^{-1}$) | $a$/(cm・s$^{-2}$) | $s$/cm | $a'$/(cm・s$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |

注:$a$ 指智能测试上显示的加速度值,而 $a'$ 是按运动学公式自行计算的加速度。

(3) $v$-$t$ 曲线的测量

表 3-7-3 $v$-$t$ 曲线的测量数据表($t_3$ 的单位 s,$v_2$ 的单位 m・s$^{-1}$)

| 次数 | 位置 1 | | 位置 2 | | 位置 3 | | 位置 4 | | 位置 5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t_3$ | $v_2$ | $t_3$ | $v_2$ | $t_3$ | $v_2$ | $t_3$ | $v_2$ | $t_3$ | $v_2$ |
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 平均值 | | | | | | | | | | |

(4) 相同质量两滑块的碰撞

表 3-7-4 相同质量两滑块的碰撞

| 质量/g | 次数 | $v_{10}$/(cm・s$^{-1}$) | $v_1$/(cm・s$^{-1}$) | $v_{20}$/(cm・s$^{-1}$) | $v_2$/(cm・s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| $m_1=$<br>$m_2=$ | 1 | | | | |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |

(5) 不同质量两滑块的碰撞

表 3-7-5 不同质量两滑块的碰撞

| 质量/g | 次数 | $v_{10}$/(cm・s$^{-1}$) | $v_1$/(cm・s$^{-1}$) | $v_{20}$/(cm・s$^{-1}$) | $v_2$/(cm・s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| $m_1+m_2=$<br>$m_3=$ | 1 | | | | |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |

**2. 数据处理(data processing)**

(1) 根据表 3-7-1 的测量值判断你所做的实验是否是匀速直线运动,并算出 $v_2-v_1$ 的差值。

(2) 根据表 3-7-2 的测量值,计算出加速度 $a'=\frac{v_2^2-v_1^2}{2s}$ 的值,并与智能测试仪显示的 $a$ 进行比较。

(3) 根据表 3-7-3 的实验数据求出平均值,并在坐标纸上绘制 $v$-$t$ 曲线;在曲线上重新任取两点 $A(v_A,t_A)$ 和 $B(v_B,t_B)$,计算 $v$-$t$ 曲线的斜率,即加速度 $a=\frac{v_B-v_A}{t_B-t_A}$ 的大小。

(4) 分别按表 3-7-4 和表 3-7-5 的数据,计算碰撞前后的动量和动能,验证动量守恒定律和机械能守恒定律。

(5) 误差分析。

## 六、注意事项(cautions)

1. 磁悬浮测试仪与实验台面均有 AC220V 电源,请注意安全!

2. 磁悬浮导轨与滑块均有较强磁场,手机、U 盘和手表等切勿靠近。

3. 非实验操作过程应取出滑块,尽量减少滑块在导轨的时间,防止滑轮被磁化。

4. 称量磁浮滑块质量时,请用非铁材料放于滑块下方,防止磁铁与电子天平相互作用,影响称量准确性。

## 七、思考题(exercises)

试分析测定加速度和验证动量守恒与机械能守恒实验中产生误差的主要原因。

**关键词(key words)**

速度(speed),加速度(acceleration),动量(momentum),动能(kinetic energy),机械能(Mechanical energy),钢卷尺(steel tape),磁悬浮动力学(maglev kinetics)

# 实验八　示波器的使用

示波器是一种应用十分广泛的电子测量仪器，可分为两大类：数字示波器和模拟示波器。阴极射线示波器属于模拟示波器，简称示波器，它可以把原来肉眼看不见的变化电压变换成可见的图像，使人们直接观察电信号的波形和高速变化情况，研究它们瞬间变换过程。示波器不仅能观察各种不同信号幅度随时间变化的波形曲线，还可以用它测试各种不同的电量，如电压、电流、电阻、频率、相位差、调幅度，等等。通过各种功能传感器，示波器还可用来观察各种物理量、化学量、生物量等的高速变换过程。现在示波器已成为所有高科技的研究、开发和应用单位的必备的基本仪器，各行各业的检测和生产部门都离不开它。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 了解示波器的主要组成部分和工作原理；
2. 熟悉示波器各控制旋钮的作用，学会使用示波器和信号发生器；
3. 学习使用示波器测定正弦信号的幅度和周期；
4. 观察李萨如图形，巩固对相互垂直振动合成的理解。

## 二、实验原理(experimental principle)

### 1. 示波器的结构(structure of an oscilloscope)

示波器的规格和型号很多(本实验中使用的是通用示波器)，但不论什么示波器，基本由几部分组成：示波管(又称为阴极射线管，cathode ray tube，CRT)，电压放大器($X$，$Y$ 方向)，扫描发生器(锯齿波发生器)，触发同步和电源等。

如图 3-8-1 所示是通用示波器的原理框图，其中“示波管”是示波器的核心部件，显示信号的波形。“$Y$ 放大或衰减”是将从“$Y$ 输入”的信号放大或衰减，送到示波器的竖直偏转系统。“$X$ 放大或衰减”是将从“$X$ 输入”的信号放大或衰减，送到示波器的水平偏转系统。当

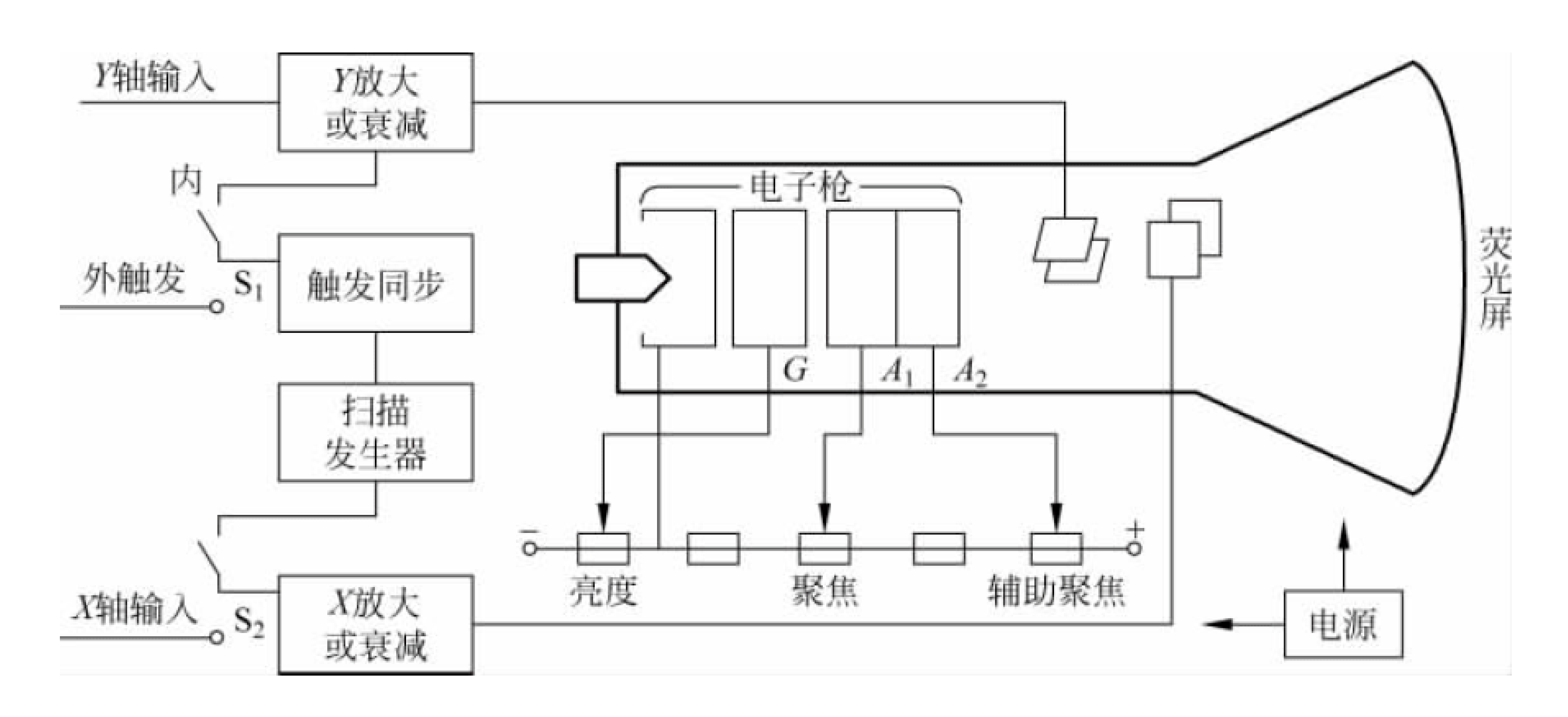



图 3-8-1　示波器的原理框图

需要观测波形时，将“$S_2$”扳向上方，当需要将两个信号正交合成时，将“$S_2$”扳向下方。“扫描发生器”电路能产生锯齿波电压，与“$Y$ 输入”的信号正交合成后能显示“$Y$ 输入”信号的波形，触发同步电路的作用是使波形稳定。

1）示波管

示波管是示波器的心脏，它是一个被抽成真空的玻璃泡，如图 3-8-2 所示，主要包括电子枪、偏转系统和荧光屏三部分。

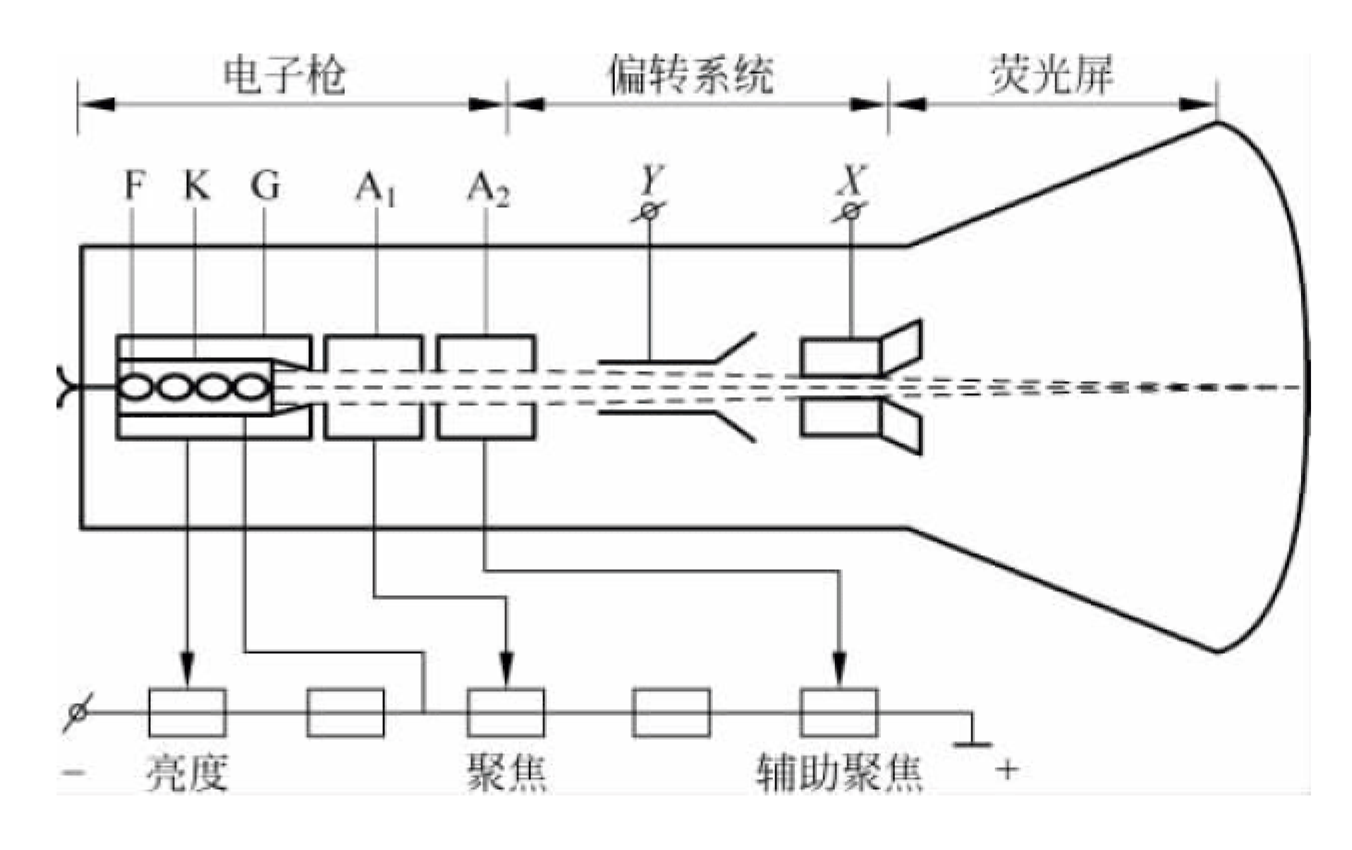



图 3-8-2　示波管的结构

电子枪用于发射和加速电子束，由灯丝 F、阴极 K、栅极 G、第一阳极 $A_1$、第二阳极 $A_2$ 组成。当灯丝 F 通电加热阴极 K，K 受热后发射出大量电子。$A_1$ 带高压电，对电子加速。$A_2$ 带更高电压(数千伏)，对电子第二次加速。被加速的电子流以高速打到屏上。栅极 G 对阴极 K 有一负电势，改变电势的高低可以改变电子流的强度从而控制辉度。调节 $A_1$ 对 $A_2$ 的电势差，可以改变电子枪内的空间电场线分布，从而控制电子束的发散达到聚焦的作用。

偏振系统由纵向“$Y$”和横向“$X$”两对相互垂直的偏转板分别控制电子束的垂直和水平偏转。理论和实践证明荧光屏上光点偏离中心的距离 $L$ 与偏转板上所加电压 $V$ 的大小成正比：

$$L = SV \tag{3-8-1}$$

式中，比例系数 $S$ 称为电压灵敏度，单位是 $\mathrm{mm \cdot V^{-1}}$。

荧光屏上涂有荧光剂，当高速电子流打上去就会发光。荧光屏玻璃内表面有一块透明的、带刻度的坐标板，方便测定光点位置。当电子流停止后，荧光剂的发光需经过一定时间才会停止，称为余晖效应。

2）电压放大和衰减器

由于示波管本身的 $X$ 轴偏转板和 $Y$ 轴偏转板的灵敏度不高，为 $0 \sim 1\mathrm{mm \cdot V^{-1}}$。当加入偏转板的信号电压较小时，电子束不能发生足够的偏转，以致屏上的光点位移过小，不便观测，这就需要预先将小的信号电压加以放大后再加到偏转板上。为此设置 $X$ 轴和 $Y$ 轴电压放大器。而 $X$ 轴和 $Y$ 轴电压衰减器的作用是使过大的输入信号电压变小以适应放大器的要求，否则放大器不能正常工作，使输入信号发生畸变，甚至使仪器受损。

3）扫描系统

扫描系统也称为时基电路，用来产生一个随时间作线性变化的扫描电压，这种扫描电压

随时间变化的关系如同锯齿,故又称为锯齿波电压。这个电压经 $X$ 轴放大器放大后加到示波管的水平偏转板上,使电子束产生水平扫描。这样,荧光屏上的水平坐标变成时间坐标,$Y$ 轴输入的被测信号波形就可以在时间轴上展开。扫描系统是示波器显示被测电压波形必需的重要组成部分。

**2. 示波器显示波形的原理(principle of oscillograph waveshape display)**

若只在竖直($Y$)偏转板上加一交变的正弦电压,则电子束的亮点将随电压的变化在竖直方向来回运动;如交变电压的频率较高,则在荧光屏上看到的是一条竖的亮直线,如图 3-8-3 所示。

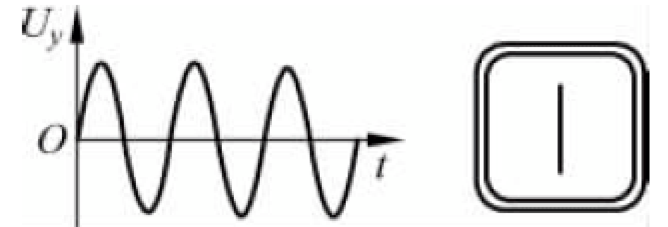



图 3-8-3　竖直偏转板上加正弦电压情形

若只在水平($X$)偏转板加一扫描电压(也叫锯齿波电压),则电子束的亮点会沿水平方向来回迅速移动,并不断重复这一过程;电子束沿水平方向从左到右的匀速移动过程称为扫描,当频率足够高时,荧光屏上看到的是一条横的亮直线,如图 3-8-4 所示。

若在竖直($Y$)偏转板上加一交变的正弦电压,同时水平($X$)偏转板加一锯齿波电压,则电子束除受到竖直方向电场的作用,同时又受水平方向电场的作用,如图 3-8-5 所示。如果交变正弦电压与锯齿波电压的周期完全相同,或后者是前者的整数倍,则在荧光屏上可显示出一个或几个完整的正弦波形;所显示的波形是加在竖直($Y$)偏转板上待测信号的波形,这就是示波器显示波形的基本原理。

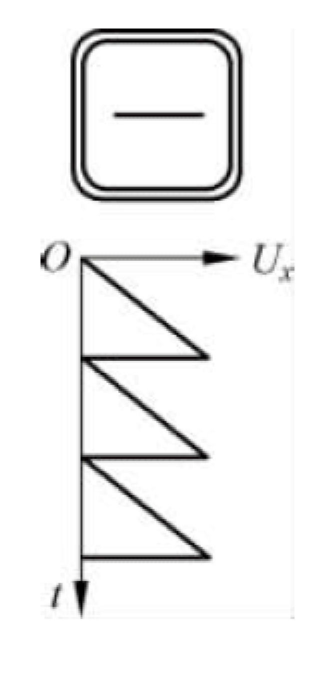



图 3-8-4　锯齿波

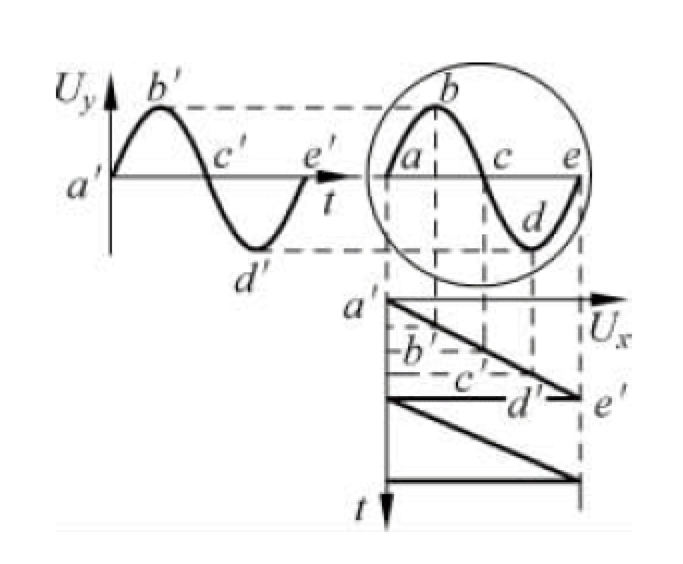



图 3-8-5　示波器显示波形原理

**3. 用示波器测量交流电的电压(measurement of AC voltage with an oscilloscope)**

被测交流电压的峰峰(波峰和波谷)值 $U_{PP}$ 等于示波器荧光屏上波形的高度(DIV)与电压分度值(VOLTS/DIV)的乘积,即

$U_{PP}$ = 交流电压峰峰值间的格数 × 电压分度数(即选定的 VOLTS/DIV 值)(V)

正弦交流电压的有效值为

$$U = \frac{U_{PP}/2}{\sqrt{2}}(\mathrm{V}) \tag{3-8-2}$$

**4. 用示波器测量交流电的频率(measurement of the frequency of alternating current with an oscilloscope)**

待测交流信号的周期 $T$ 等于示波器荧光屏上的一个完整波形的宽度(DIV)与扫描时间

因数(TIME/DIV)的乘积,即

$$T = \frac{n\text{个波形的水平格数}}{\text{完整波形数}n} \times \text{扫描时间因数(即 TIME/DIV)(s)}$$

则待测交流信号的频率为

$$f = \frac{1}{T}(\text{Hz}) \tag{3-8-3}$$

**5. 用李萨如图法测频率(measurement of the frequency through lissajous figures)**

当水平($X$)偏转板和竖直($Y$)偏转板同时输入正弦交流电压时,电子束同时受到 $X$ 和 $Y$ 方向电场的作用,因此电子束在荧光屏上亮点的运动轨迹是两个相互垂直的简谐振动合成的结果。若 $X$ 方向的振动频率与 $Y$ 方向的振动频率相等,即 $f_x=f_y$ 时,运动轨迹为一正椭圆;若 $X$ 方向振动频率与 $Y$ 方向振动频率比 $f_x:f_y$ 为简单整数比,则运动轨迹为封闭且稳定的图形,称为李萨如图。

参见表 3-8-1 中列出了几个实例。设李萨如图形与平行于 $X$ 轴的一直线相切的切点数 $N_x$,与平行于 $Y$ 轴的一直线相切的切点数 $N_y$;$X$ 轴方向、$Y$ 轴方向的振动频率分别为 $f_x$,$f_y$,则有

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_x}{N_y} \tag{3-8-4}$$

若 $f_x$ 已知,根据李萨如图形及李萨如图形与 $X$ 轴和 $Y$ 轴的切点数 $N_x$,$N_y$ 的比,由式(3-8-4)可以求出未知频率 $f_y$。

**表 3-8-1　李萨如图形举例**

| $f_x:f_y$ | 1∶1 | 2∶1 | 3∶1 | 3∶2 |
|---|---|---|---|---|
| 李萨如图形 | | | | |
| $N_x$ | 1 | 1 | 1 | 2 |
| $N_y$ | 1 | 2 | 3 | 3 |

## 三、实验仪器(experimental device)

**1. 信号发生器**

信号发生器有很多种类,其面板、结构及用法各有差异,现以 SVX-7 型低频信号发生器为例介绍信号发生器的使用方法。

SVX-7 型多功能信号发生器的面板图如图 3-8-6 所示。它可以输出在 50～500kHz 范围内的连续波和脉冲波,输出信号的频率可由“频率粗调”和“频率细调”旋钮连续调节。接收增益:用于调节仪器内部的接收增益。连续波强度:用于调节输出信号电功率(输出电压),仅连续波有效。

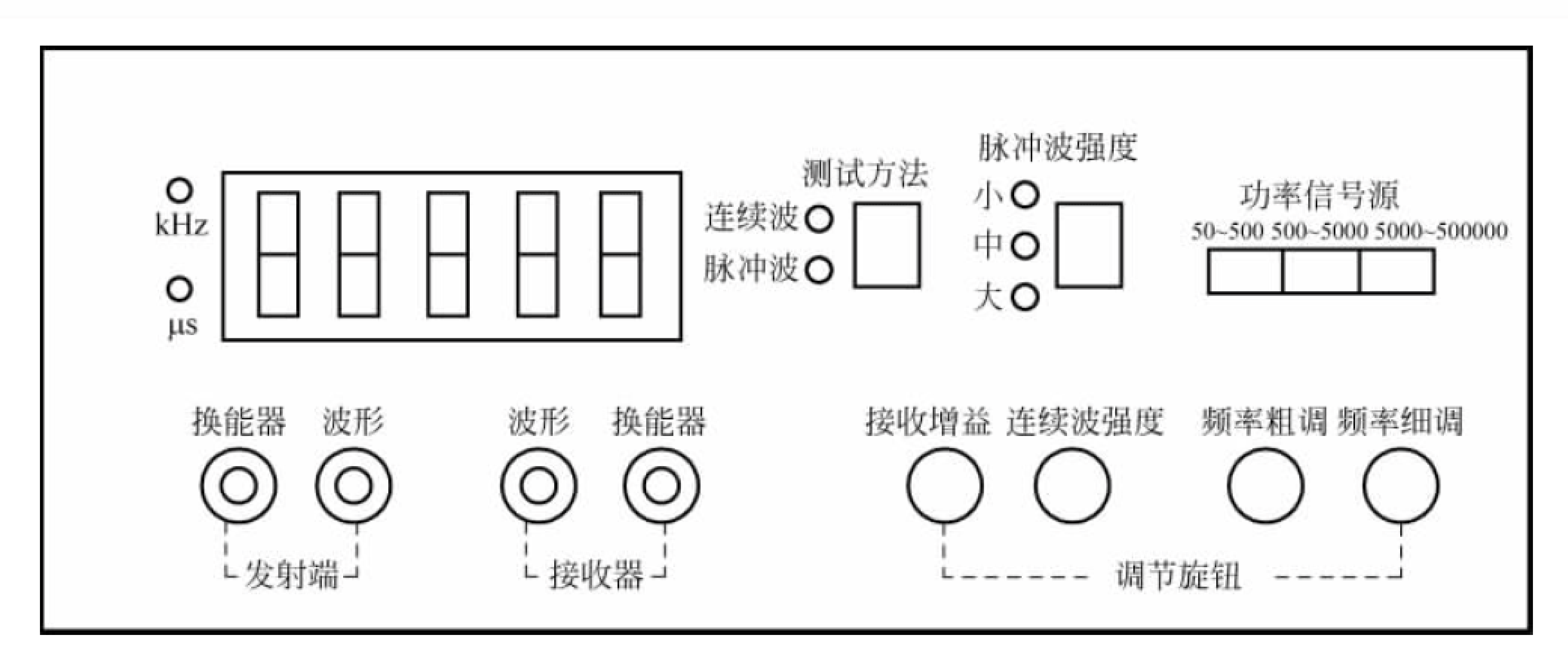



图 3-8-6　SVX-7 型多功能信号发生器的面板图

**2. 双踪示波器**

示波器的品种多样，型号各异，但基本功能相似，现以红华 5020BF 型号为例，阐明各按钮和开关的功能及其使用方法。红华 5020BF 型号示波器是一种双踪示波器，即能观测单一信号的波形，也能同时观测两个信号的波形，其面板结构示意图如图 3-8-7 所示。本实验使用的另一种示波器(DF4321C 型号)面板结构图详见图 3-8-9。

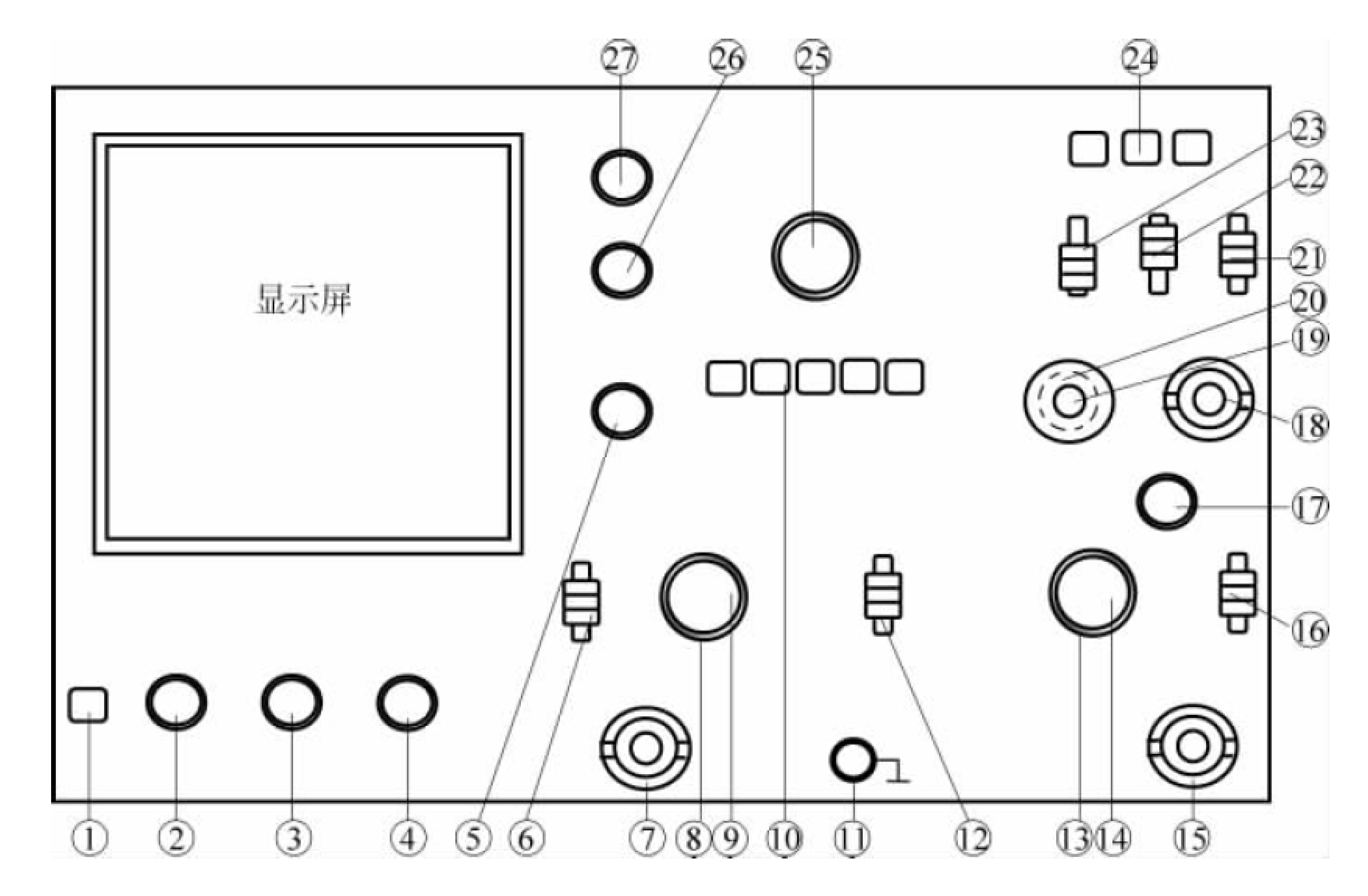



图 3-8-7　红华 5020BF 型号示波器面板示意图

1) 示波器面板说明

① 电源开关(POWER)：开关开启，指示灯亮。

② 辉度(INTEN)：调节该按钮，用以改变光点或波形的亮度。

③ 聚焦(FOCUS)：调节该按钮，用以改变屏上光点的大小或波形线条的粗细。

④ 亮度(ILLUM)：调节刻度照明的亮度。

⑤ 垂直位移(POSITION)：调节该按钮，用以改变加在竖直偏转板上(CH1($X$)通道)直流电压的大小和极性，来改变屏上波形上下的位置。

⑥ AC-GND-DC：CH1 通道的输入信号选择开关，交流信号按 AC 键；直流信号按 DC 键；按 GND 键输入信号通路断开，同时放大器输入端接地。

⑦ CH1($X$)：CH1($X$)通道信号输入插孔，用于垂直信号的输入，当用于“$X$-$Y$”方式时，变为 $X$ 轴输入。

⑧ VOLTS/DIV：CH1($X$)通道的电压衰减开关，从 5mV/cm～5V/cm 共分 10 挡。

⑨ 微调(VARIABLE)：CH1($X$)通道的电压偏转因数微调。

⑩ $Y$ 方式(VERT MODE)：选择垂直系统的工作方式。

⑪ 接地端。

⑫ 内触发信号源(INT TRIG)：选择内部信号作为触发信号。当置于“$X$-$Y$”($X$-$Y$)工作方式时，起连通信号的作用。

⑬ VOLTS/DIV：CH2($Y$)通道的电压衰减开关，从 5mV/cm～5V/cm 共分 10 挡。

⑭ 微调(VARIABLE)：CH2($Y$)通道的电压偏转因数微调。

⑮ CH2($Y$)：CH2($Y$)通道信号的输入插孔，当用于“$X$-$Y$”方式时，变为 $Y$ 轴输入。

⑯ AC-GND-DC：CH2($Y$)通道的输入信号选择开关：交流信号按 AC 键；直流信号按 DC 键；按 GND 键输入信号通路断开，同时放大器输入端接地。

⑰ 垂直位移(POSITION)：CH2($Y$)通道的垂直位移。调节该按钮，用以改变加在竖直偏转板上直流电压的大小和极性，来改变屏上波形上下的位置。

⑱ 外触发(ESTTRIG/EXT HOR)：这个输入端作为外触发信号和外水平信号的公用输入端，用此输入端时，“触发源”开关应置于“外”位置。

⑲ 电平调节(LEVEL)：当此旋钮置“锁定”位置时，不论信号幅度大小，触发电平自动保持在最佳状态。

⑳ 释抑(HOLDOFE)：释抑时间调节。

㉑ 触发源(SOURCE)：选择触发信号。

㉒ 耦合方式(COUPLING)：选择信号源和触发电路之间耦合方式，也选择 TV 同步电路的连接方式。

㉓ 触发极性(SLOPE)：“＋”在信号正斜率上触发，“－”在信号负斜率上触发。

㉔ 扫描方式(SWEEP MODE)：选择需要的扫描方式，选择“自动(AUTO)”按钮，表示无触发信号加入，或触发信号频率低于 50Hz 时，扫描为自激方式。

㉕ 扫描时间因数(TIME/DIV)：扫描速度的选择范围由 0.2μs/div～0.2s/div，按 1-2-5 进制分 19 挡和 $X$-$Y$ 工作方式。当这个开关设置在“$X$-$Y$”位置时，$X$ 信号接 CH1，$Y$ 信号接 CH2。

㉖ 微调(VARIABLE)：扫描时间因数微调，此旋钮置于“校准”位置时，扫描时间因数被校准到面板指示值，该旋钮拉出时处于×10 扩展状态。

㉗ 水平位移(POSITION)：调节该按钮，用以改变加在水平偏转板上直流电压的大小和极性，来改变屏上波形左右的位置。

2）基本操作

(1) 电源插入插座前，按表 3-8-2 所示内容设置仪器的开关及控制钮。

表 3-8-2 实验前面板设置工作

| 项　　目 | 代　　号 | 位置设置 |
| --- | --- | --- |
| 电源 | ① | 断开 |
| 辉度 | ② | 时钟 3 点位置 |
| 聚焦 | ③ | 中间位置 |
| 标尺亮度 | ④ | 逆时针旋到底 |
| Y 方式 | ⑩ | $Y_1$ |
| ↕垂直位移 | ⑤,⑰ | 中间位置,推进去 |
| VOLTS/VIV | ⑧,⑬ | 10mV/cm |
| 微调 | ⑨,⑭ | 校准(顺时针旋到底),推进去 |
| AC-GND-DC | ⑤,⑯ | GND |
| 内触发 | ⑫ | $Y_1$ |
| 触发源 | ㉑ | 内 |
| 耦合 | ㉒ | AC |
| 极性 | ㉓ | + |
| 电平 | ⑲ | 锁定(逆时针旋到底) |
| 释抑 | ⑳ | 常态(逆时针旋到底) |
| 扫描方式 | ㉔ | 自动 AUTO |
| X 方式 | ㉔ | A(HH4311A，HH4314A) |
| TIME/DIV | ㉕ | 0.5ms/cm |
| 微调 | ㉖ | 校准(顺时针旋到底),推进去 |
| ↔水平位移 | ㉗ | 中间位置 |

(2) 各开关及控制钮设置好后,接入交流电源,按下列步骤操作:

① 打开电源开关,等待约 20s,屏幕会出现一扫描线;

② 调节“辉度”和“聚焦”旋钮,使扫描线最清晰,且亮度适中;

③ 将探头接到 $Y_1$ 输入端,将 0.5$V_{P\text{-}P}$校准信号加到探头上;

④ 将 AC-GND-DC 开关置 AC,屏幕会显示如图 3-8-8 所示波形;

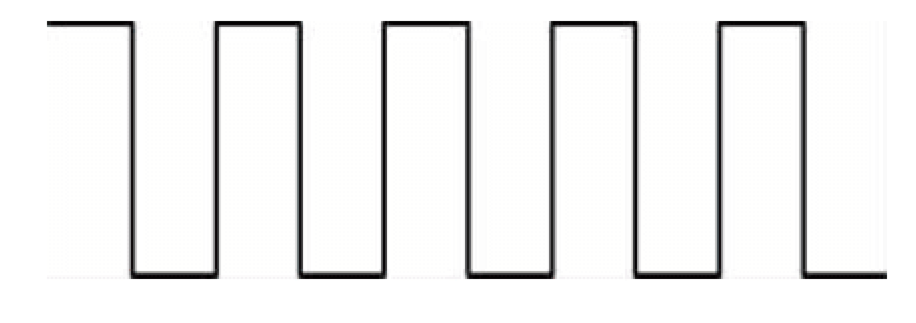


图 3-8-8　矩形波

⑤ 调节“聚焦”旋钮,使波形最清晰;

⑥ 调节 VOLTS/DIV 和 TIME/DIV 至适当位置,使显示的波形幅度适中,周期适中;

⑦ 调节↕和↔位移,使显示的波形对准刻度,以便测定电压值 $V_{P\text{-}P}$和周期 $T$。

3) 操作注意事项

示波器的输入端和探头输入端的电压不宜超过其承受的最大极限值(表 3-8-3)。

表 3-8-3　输入端最大电压值

| 输入端 | 最大允许输入电压 |
|---|---|
| $Y_1$,$Y_2$ 输入 | $400V_{P\text{-}P}(DC+AC_{峰峰值})$ |
| 外触发输入 | $100V_{P\text{-}P}(DC+AC_{峰峰值})$ |
| 探头输入 | $400V_{P\text{-}P}(DC+AC_{峰峰值})$ |
| $Z$ 轴输入 | $50V_{P\text{-}P}(DC+AC_{峰峰值})$ |

注：交流频率不得超过 1kHz。

4）DF4321C 型示波器

DF4321C 型示波器面板图如图 3-8-9 所示。

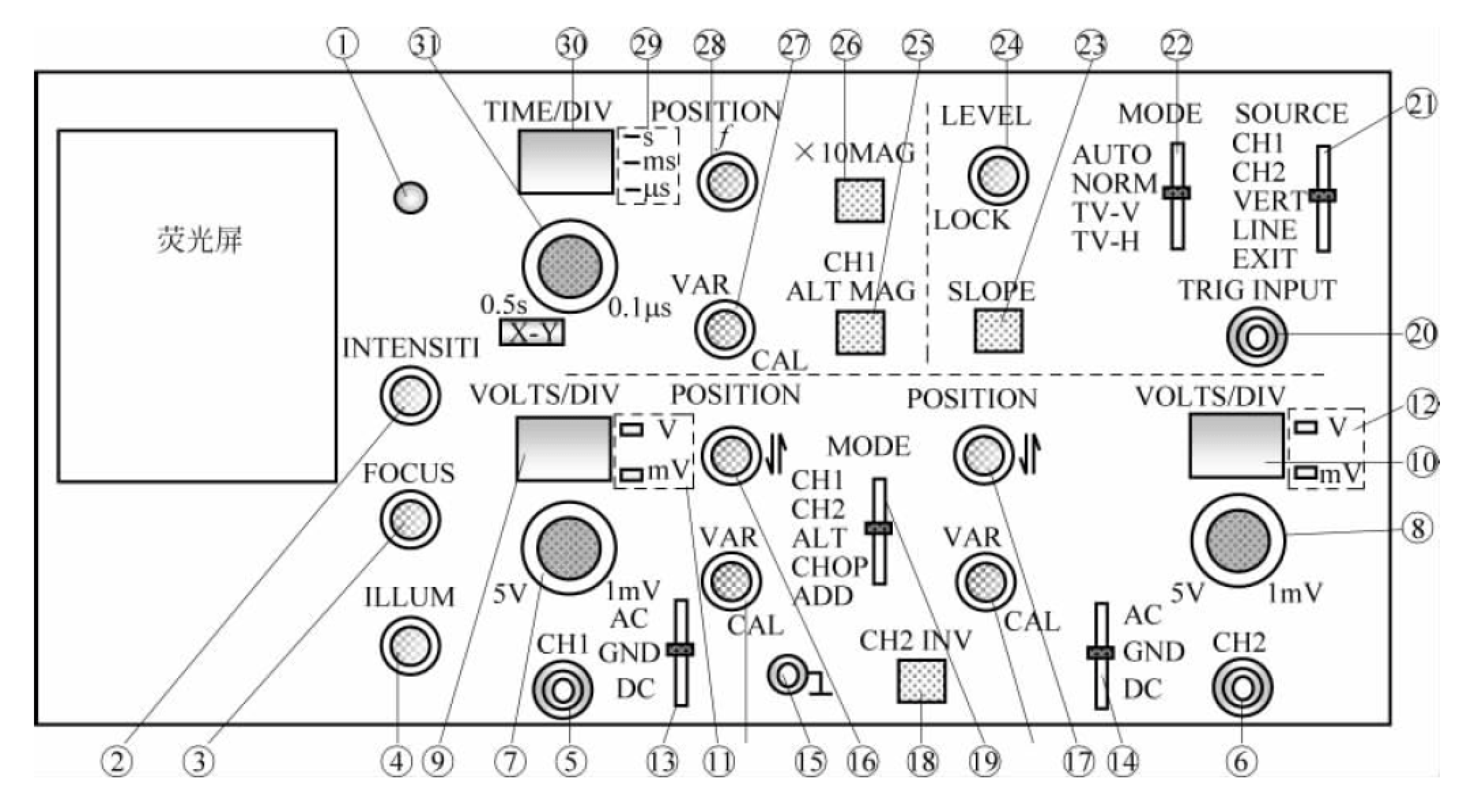



图 3-8-9　DF4321C 型示波器面板图

① POWER 电源；

② INTENSITI 亮度；

③ FOCUS 聚焦；

④ ILLUM 刻度照明；

⑤ CH1 INPUT 通道 1 输入；

⑥ CH2 INPUT 通道 2 输入；

⑦,⑧ VOLTS/DIV 电压挡位；

⑨,⑩ 电压量程数字显示；

⑪,⑫ V,mV 电压量程指示灯；

⑬,⑭ AC-GND-DC 输入耦合开关：AC-交流信号；GND-垂直轴放大器输入接地；

⑮ GND 示波器接地端；

⑯,⑰ POSITION 垂直方向位移；

⑱ CH2 INV CH2 极性按钮；

⑲ MODE 垂直工作方式选择开关：CH1-加到 CH1 的信号在屏幕显示；CH2-加到 CH2 的信号在屏幕显示；ALT-加到 CH1、CH2 的信号交替在屏幕显示；CHOP-加到 CH1、CH2 的信号同时在屏幕显示；ADD-加到 CH1、CH2 信号的代数和在屏幕显示；

⑳ TRIG INPUT 外触发信号输入；

㉑ SOURCE 同步触发源选择：CH1-取加到 CH1 的信号为触发源；CH2-取加到 CH2 的信号为触发源；VERT-触发信号交替取自于 CH1、CH2，用于同时观察两不同频率的波形；LINE-取电源信号为触发源；EXIT-取加到 20 的外接信号为触发源；

㉒ TRIG MODE 触发方式选择开关：AUTO-仪器自动触发；NORM-只有触发信号存在时才能触发扫描，适于信号频率较低情况(25Hz 以下)；

㉓ SLOPE 触发极性选择开关；

㉔ LEVEL 触发电平控制旋钮，逆时针旋到底，同步锁定；

㉕ CH1 ALT MAG 通道 1 交替扩展开关。CH1 输入信号能以×1(常态)和×10(扩展)两种状态交替显示；

㉖ ×10 MAG CH1 输入信号以×10(扩展)状态；

㉗ VAR 扫描时间因数微调，此旋钮置于“校准”位置时，扫描时间因数被校准到面板指示值；

㉘ POSITION 水平位移调节按钮，用以改变加在水平偏转板上直流电压的大小和极性，来改变屏上波形左右的位置；

㉙ 扫描时间选择量程指示灯：—s 秒；—ms 毫秒；—$\mu$s 微秒；

㉚ TIME/DIV 扫描时间因数数字显示；

㉛ TIME/DIV 扫描时间因数扫描速度的选择范围，逆时针旋到底为 X-Y 状态。

## 四、实验内容(experimental content)

### 1. 熟悉示波器面板上各旋钮的功能及使用方法

(1) 按下电源开关，预热 15s；

(2) 适当调整辉度、位置和扫描等旋钮，直至扫描线出现；

(3) 调节聚焦旋钮并适当调整位置旋钮，使荧光屏中央显示清晰明亮的扫描线。

### 2. 测量交流信号电压的峰峰值 $U_{PP}$

(1) 接通信号发生器，调节输出旋钮，频率倍率置×1 挡，衰减挡位置 0dB(即不衰减)，调节频率为 50Hz。

(2) 将信号发生器的待测信号接入示波器，并选用 CH1 通道，并调节示波器：垂直工作方式(MODE)置于 CH1，触发方式(TRIG MODE)置于 AUTO，触发信号源(TRIG SOURCE)置于 CH1，交流或地或直流(AG-GND-DC)置于 AC，电压微调和校准(VAR-CAL)置于 VAR 校准状态(也可选用 CH2 通道，只需将相应旋钮置于 CH2)。

(3) 调节 TIME/DIV 和 LEVEL 旋钮，选择适当 VOLTS/DIV 挡位，使荧光屏显示位置适中而稳定的适于观察的波形，以便于测量(显示 2～3 个波形为宜)。

(4) 在荧光屏上读出波形的高度，或者说在垂直方向的格数(即 DIV 格数)，将数据记录于表 3-8-4 中。

(5) 改变信号源输出信号的电压,重复步骤(3)和(4),测 3 组电压值。

**3. 测量交流信号的频率**

(1) 按内容步骤 1、2 的方法调节好信号发生器与示波器,荧光屏显示稳定的波形。

(2) 调节合适的 TIME/DIV 挡位,锁定 LEVEL 旋钮,使荧光屏显示位置适中而稳定的适于测量的波形(显示 1～2 个完整波形为宜)。

(3) 测出 $n$ 个完整波形的宽度(即水平方向的格数),数据记录于表 3-8-5 中。

(4) 改变信号源的频率(分别设置为 100Hz、500Hz、1000Hz),重复步骤(2)和(3),测量 3 个频率值。

**4. 观察李萨如图形**

将两个独立的正弦波信号分别输入到示波器的 CH1 和 CH2 通道,并调节两信号的频率成简单整数比,观察李萨如图;改变两信号的频率比,观察不同频率比下的李萨如图形。由于通用示波器的"CH2Y"通道可由示波器内部链接 50Hz 交流电信号,操作方式如下:

(1) TIME/DIV 旋钮逆时针旋转到底,即"$X$-$Y$"挡。

(2) 触发源选择"LINE"。

(3) 把交流信号源 $f_x$=50Hz 作为标准频率,改变输入端的频率,可以得到不同频率比的李萨如图,按表 3-8-1 的频率比,观察对应的李萨如图。

(4) 按表 3-8-6 中的频率要求,调出相应的李萨如图,并绘制到表 3-8-6 中。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

**1. 数据记录(data recording)**

1) 测量交流信号电压的峰峰值 $U_{PP}$。

**表 3-8-4　测量交流信号电压的峰峰值 $U_{PP}$**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 波形高度/DIV | | | |
| VOLTS/DIV | | | |
| 峰峰值 $U_{PP}$/V | | | |
| 电压有效值 $U$/V | | | |

2) 测量交流信号的频率 $f$。

**表 3-8-5　测量交流信号的频率**

| 信号发生器指示值/Hz | 100 | 500 | 1000 |
|---|---|---|---|
| 完整波形一个周期对应的格数 | | | |
| TIME/DIV | | | |
| 周期/s | | | |
| 频率/Hz | | | |

3）观察并描绘李萨如图形

**表 3-8-6　描绘李萨如图形**

| $f_x:f_y$ | 1∶1 | 1∶2 | 2∶3 | 3∶4 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 李萨如图形 | | | | |

**2. 数据处理(data processing)**

(1) 根据表 3-8-4 的测量值，按式(3-8-2)算出电压的有效值。

(2) 根据表 3-8-5 的测量值，按式(3-8-3)算出你所测得的交流信号的频率 $f$，并计算相对误差。

(3) 根据你观察到的李萨如图，写出对应的切点数比，并验证公式$\frac{f_y}{f_x}=\frac{N_x}{N_y}$。

(4) 误差分析。

## 六、注意事项(cautions)

1. 仪器与实验台面均有 AC220V 电源，请注意安全！
2. 爱护仪器，各旋钮应轻拨轻动，不得随意乱扭。
3. 荧光屏辉度(INTENSITY)不宜过强，切忌单一光点长时间静止不动，以免损坏示波管。
4. 该仪器不能在强磁场或电场中使用，以免测量结果受场的影响。

## 七、思考题(exercises)

1. 观测交流电压波形时，图形常会缓慢平移，如何调节，使其稳定不动？
2. 观测李萨如图形时，图形常会缓慢变换，如何调节，使其基本稳定？

**关键词(key words)**

示波器(oscillograph)，荧光屏(fluorescent screen)，电子枪(electron gun)，偏转系统(deflection system)，正弦波(sine wave)，锯齿波(sawtooth wave)，放大器(amplifier)

# 实验九　霍尔效应

霍尔效应是导电材料中的电流与磁场相互作用而产生电动势的效应。1879 年美国霍普金斯大学研究生霍尔在研究金属导电机理时发现了这种电磁现象，故称霍尔效应。根据该效应生产的霍尔器件，既可以检测磁场，也可以检测电流，还可以检测位移、振动以及其他能转换成位移量变化的物理量，同时霍尔器件还具有线性特性好，灵敏度高，稳定性好，控制简单，方便等特点。所以，霍尔器件在自动检测、自动控制和信息技术等方面获得广泛的应用，如在一些具有四遥（遥调、遥控、遥测、遥信）功能的设备上常有它的踪影。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 了解霍尔效应原理及霍尔元件有关参数的含义和作用；
2. 学习利用霍尔效应测量磁感应强度 $B$ 及磁场分布；
3. 测量霍尔元件的 $U_H$-$I_S$ 和 $U_H$-$I_M$ 曲线，了解霍尔电势差 $U_H$ 与霍尔元件工作电流 $I_S$、磁感应强度 $B$ 及励磁电流 $I_M$ 之间的关系；
4. 学习用“对称测量法”消除负效应产生的系统误差。

## 二、实验原理（experimental principle）

### 1. 霍尔效应（Hall effect）

霍尔效应从本质上讲是运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力作用而引起的偏转。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷的积累，从而形成附加的横向电场。

将一载流导电板放在磁场中，磁场方向与导电板板面垂直，且沿导电板纵向通有电流 $I$，则在与磁场 $B$ 和电流 $I$ 两者垂直的方向（$AA'$）上就会出现一定的横向电势差。这种现象称为霍尔效应，电势差称为霍尔电势差或霍尔电压，用 $U_H$ 表示，其值

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \tag{3-9-1}$$

设导电板中载流子的电荷为 $q$（带正电荷的载流子），其定向的平均漂移速度为 $\boldsymbol{v}_d$，则载流子在磁场中所受洛伦兹力为

$$F_m = qv_d B \tag{3-9-2}$$

由右手定则可知 $F_m$ 指向 $A$ 侧，则载流子向导电板的 $A$ 侧移动，从而使 $A$，$A'$ 两侧分别积累正负电荷，结果在 $A$，$A'$ 方向形成电场；因此，载流子在电场中受到与洛伦兹力方向相反的电场力 $F_e$ 的作用；随着 $A$，$A'$ 两侧电荷的积累，载流子所受电场力 $F_e$ 不断增加，当电场力 $F_e$ 增大到与载流子所受磁场力 $F_m$ 的大小相等时，达到动态平衡，载流子不再偏转（见图 3-9-1）；达到平衡时 $A$，$A'$ 两侧形成稳定的电场，称为霍尔电场，其场强用 $E_H$ 表示。设导电板宽度为 $b$，厚度为 $d$，则

$$E_H = \frac{U_H}{b} \tag{3-9-3}$$

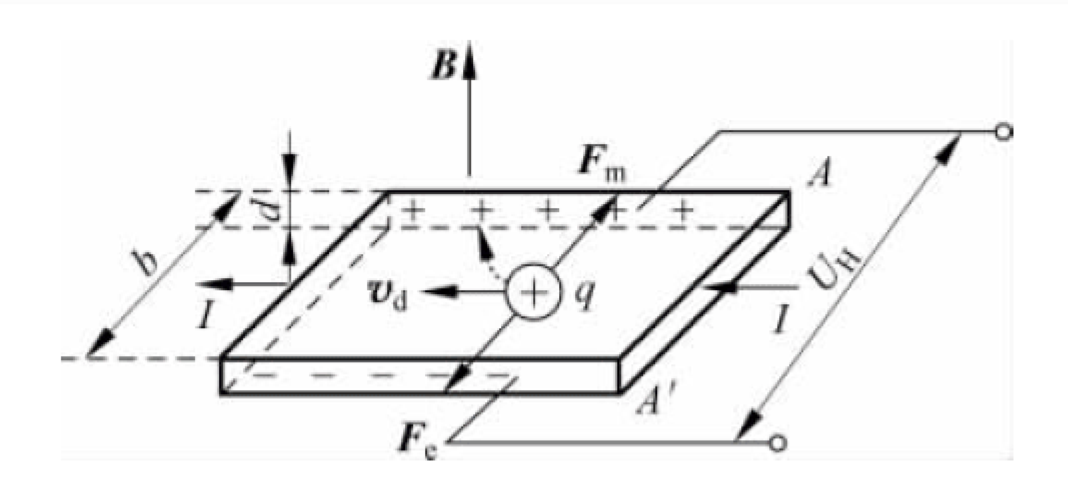



图 3-9-1　霍尔效应原理

平衡时有 $F_e = F_m$，则可得

$$U_H = bv_dB \tag{3-9-4}$$

由于电流 $I = nqv_d \cdot bd$，式中 $n$ 为导电板中载流子的数目。则霍尔电势差为

$$U_H = \frac{IB}{nqd} \tag{3-9-5}$$

令 $R_H = \frac{1}{nq}$，称为霍尔系数，它是反映材料霍尔效应强弱的重要系数，于是有

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \tag{3-9-6}$$

若令 $K_H = \frac{R_H}{d}$，则霍尔电势差可写成

$$U_H = K_H IB \tag{3-9-7}$$

其中，$K_H$ 称为霍尔灵敏度，对一定的霍尔元件是一个常数。它的大小与材料的性质以及元件的尺寸有关，它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流强度下的霍尔电压的大小，单位为 $V \cdot A^{-1} \cdot T^{-1}$ 或 $mV \cdot mA^{-1} \cdot T^{-1}$。

由式(3-9-7)可知，当霍尔灵敏度 $K_H$ 已知时，只要测得了 $U_H$ 和 $I$，便可测出霍尔元件所在处的磁场 $B$。

**2. 负效应及其消除方法(negative effects and elimination method)**

上面讨论的是霍尔电势差的测量，实际上在实验中测出的电压除霍尔电压外，还包括其他因素带来的附加电压，从而产生系统误差。这些附加电压主要来源有以下几个方面：

1) 由于引出电极位置不在同一等势面而产生的电势差 $U_0$。$U_0$ 仅与工作电流 $I$ 的方向有关，而与磁场 $B$ 的方向无关。

2) 与霍尔效应同时出现的热磁效应，如埃廷豪森(Ettingshausen)效应、里记-勒杜克(Righi-Leduc)效应和能斯特(Nernst)效应。这些效应都会在霍尔电势差 $U_H$ 上再叠加温差电动势 $U_E$，$U_{RL}$，$U_N$。$U_E$ 与 $I$，$B$ 的方向有关，而 $U_{RL}$，$U_N$ 只与 $B$ 的方向有关。

所以在磁场 $B$ 和工作电流 $I$ 已确定的条件下，实际测出的横向电势差应是 $U_H$，$U_0$，$U_E$，$U_{RL}$，$U_N$ 的代数和。

3) 负效应消除方法

在作精确测量时应考虑这些负效应，并消除各负效应引入的误差。

热电效应引起的附加电压 $U_E$，一般远小于霍尔电压，尤其在非大电流和非强磁场情况下 $U_E$ 非常小，因此可以忽略；其他三种附加电压 $U_N$，$U_{RL}$，$U_0$ 可通过对称测量法予以消除，即在测量时可改变工作电流 $I$ 和磁感强度 $B$ 方向的方法，以消除这些附加电压。例如测量

时，首先任取某一方向的 $I$ 和 $B$ 为正，用 $I$，$B$ 表示，当改变它们的方向为负时，用 $-I$，$-B$ 表示，保持 $I$ 和 $B$ 的数值不变，取$(B, I)$，$(B, -I)$，$(-B, -I)(-B, I)$四种条件进行测量，测量结果分别为

$$U_1 = U_H + U_0 + U_N + U_{RL} + U_E \tag{3-9-8}$$

$$-U_2 = -U_H - U_0 + U_N + U_{RL} - U_E \tag{3-9-9}$$

$$U_3 = U_H - U_0 - U_N - U_{RL} + U_E \tag{3-9-10}$$

$$-U_4 = -U_H + U_0 - U_N - U_{RL} - U_E \tag{3-9-11}$$

从上述结果中消去 $U_0$，$U_{RL}$和 $U_N$，得到

$$U_H = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4} - U_E \tag{3-9-12}$$

一般来说 $U_E$ 比 $U_H$ 小得多，在误差范围内可忽略不计，则有

$$U_H = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}{4} \tag{3-9-13}$$

即

$$U_H = \frac{|U_1| + |U_2| + |U_3| + |U_4|}{4} \tag{3-9-14}$$

## 三、实验仪器(experimental device)

DH4512 系列霍尔效应测试仪、DH4512 系列霍尔效应实验仪如图 3-9-2、图 3-9-3 所示。

**1. 主要仪器介绍**

1) DH4512 霍尔效应测试仪

测试仪面板图如图 3-9-2 所示，由两组恒流源和直流数字电压表组成。

(1) 两组恒流源。“$I_S$ 输出”为 0～3mA 元件工作电流源，“$I_M$ 输出”为 0～0.5A 励磁电流源。两组电流源彼此独立，两路输出电流大小通过“$I_S$ 调节”旋钮及“$I_M$ 调节”旋钮进行调节，均为连续可调。

(2) 直流数字电压表。电压表零位可通过调零电位器进行调整。当显示的数字前出现“－”号时，表示被测电压极性为负值。

(3) 面板上的“转换开关”用于霍尔电压 $U_H$ 和载流子浓度 $U_\sigma$ 测量切换，当测量霍尔电压时，将“转换开关”按钮按下，测量载流子浓度 $U_\sigma$ 时，弹起“转换开关”按钮。

2) DH4512 霍尔效应实验仪

实验仪面板如图 3-9-3 所示，主要由三个换向开关和固定在二维坐标尺上的霍尔元件组成。

(1) 换向开关。仪器装有三个换向开关，可很方便地改变 $I_S$，$B$ 的方向。

(2) 霍尔元件。实验中使用的霍尔元件是由 N 型砷化镓半导体，霍尔元件胶合在白色的绝缘衬板上，有四条引线，其中两条为工作电流极，两条为霍尔电压输出极。不同霍尔元件的灵敏度一般是不一样的，在各个仪器上有标注。

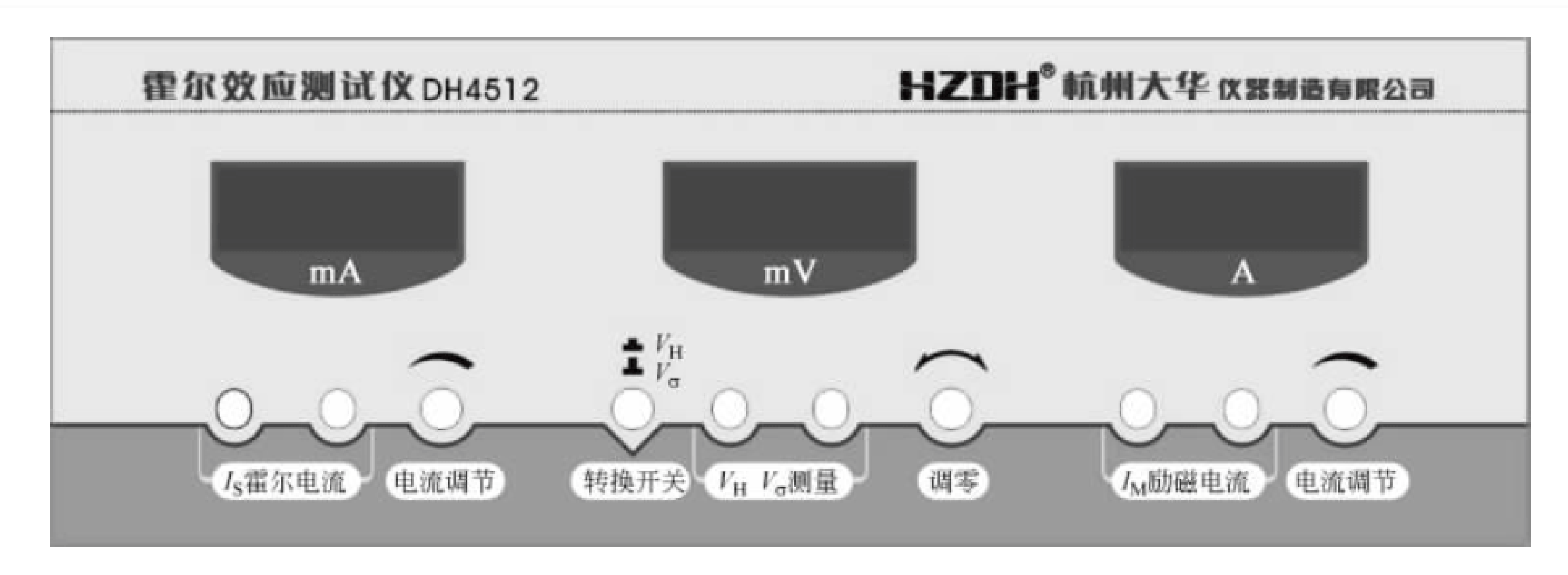



图 3-9-2 DH4512 型霍尔效应测试仪面板图

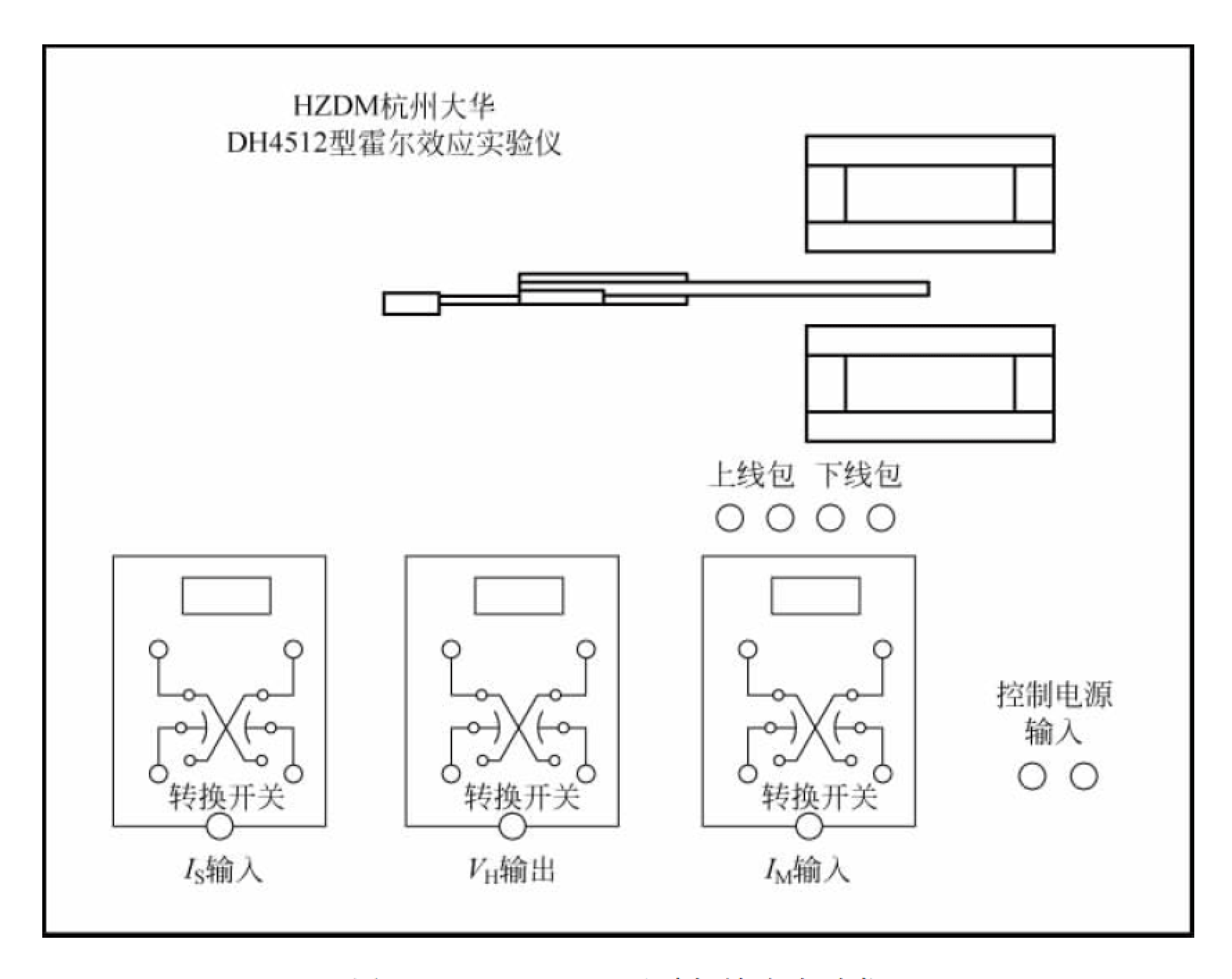



图 3-9-3 DH4512 型霍尔效应实验仪

**2. 仪器使用说明**

实验开始前先按仪器面板上的文字和符号提示将 DH4512 型霍尔效应测试仪与 DH4512 型霍尔效应实验架正确连接，连接步骤如下：

(1) 将 DH4512 型霍尔效应测试仪面板右下方的励磁电流 $I_M$ 的直流恒流源输出端(0～0.5A)，接 DH4512 型霍尔效应实验仪上的 $I_M$ 磁场励磁电流的输入端(将红接线柱与红接线柱对应相连，黑接线柱与黑接线柱对应相连)。

(2) "测试仪"左下方供给霍尔元件工作电流 $I_S$ 的直流恒流源(0～3mA)输出端，接"实验仪"上 $I_S$ 霍尔元件工作电流输入端(将红接线柱与红接线柱对应相连，黑接线柱与黑接线柱对应相连)。

(3) "测试仪"$V_H$，$V_\sigma$ 测量端，接"实验仪"中部的 $V_H$，$V_\sigma$ 输出端。

**注意**：以上三组线千万不能接错，以免烧坏元件。

(4) 将实验仪上一边是分开的接线插头、一边是双芯插头的控制连接线与测试仪背部的插孔相连接(红色插头与红色插座相连,黑色插头与黑色插座相连)。

(5) 本实验将测量霍尔电压,所以将测试仪和实验仪的转换开关都切换至 $V_H$,用连接线将中间的霍尔电压输入端短接,调节调零旋钮使电压表显示 0.00V。

(6) 实验仪中,使用了三个双刀双向继电器组成三个换向电子闸刀,换向由按钮开关控制。

(7) 仪器开机前应将 $I_S$,$I_M$ 调节旋钮逆时针旋到底,使其输出电流趋于最小状态,然后再开机。

(8) "$I_S$ 调节"和"$I_M$ 调节"分别用来控制工作电流和励磁电流的大小,其电流随旋钮顺时针方向转动而增加,细心操作。

(9) 关机前,应将"$I_S$ 调节"和"$I_M$ 调节"旋钮逆时针方向旋到底,使其输出电流趋于零,然后才可切断电源。

## 四、实验内容(experimental content)

霍尔效应实验仪的技术参数:

霍尔元件厚度 $d$=0.2mm。

霍尔元件的灵敏度(见实验仪器)

### 1. 测量磁场的磁感强度

根据仪器使用说明接好线路并设置好后(注:此时应通过调节二维坐标尺将霍尔元件放在磁场中心),将工作电流 $I_S$,励磁电流 $I_M$ 设置为零,调节电压调节旋钮使电压表示值为 0mV。取工作电流 $I$=3.00mA,励磁电流 $I_M$=500mA,用对称测量法测量霍尔电压 $U_H$,并将测量数据填入表 3-9-1。

### 2. 测定霍尔电压 $U_H$ 与工作电流 $I_S$ 的关系,并作出 $U_H$-$I_S$ 曲线

将工作电流 $I_S$,励磁电流 $I_M$ 设置为零,调节电压调节旋钮使电压表示值为 0mV。将霍尔元件置于磁场中心处,设定励磁电流 $I_M$=500mA 并固定不变,将工作电流 $I_S$ 分别取为 0.5mA,1.0mA,1.5mA,2.0mA,2.5mA,3.0mA,用对称测量法进行测量,依次改变工作电流 $I_S$,励磁电流 $I_M$ 的方向,测量 $U_1$,$U_2$,$U_3$,$U_4$,并将测量数据填入表 3-9-2。

### 3. 测定霍尔电压 $U_H$ 与励磁电流 $I_M$ 的关系,并作出 $U_H$-$I_M$ 曲线

将工作电流 $I_S$,励磁电流 $I_M$ 设置为零,调节电压调节旋钮使电压表示值为 0mV。将霍尔元件置于磁场中心处,设定工作电流 $I_S$=3.00mA 固定不变,调节励磁电流 $I_M$ 从 100mA 开始,每隔 100mA 增加至 500mA。用对称测量法测量,依次改变工作电流 $I_S$,励磁电流 $I_M$ 的方向,测量 $U_1$,$U_2$,$U_3$,$U_4$,并将测量数据填入表 3-9-3。

### 4. 测量磁场沿水平 $x$ 方向的分布,并画出 $B$-$x$ 曲线

将工作电流 $I_S$,励磁电流 $I_M$ 设置为零,调节电压调节旋钮使电压表示值为 0mV。设定工作电流 $I$=3.00mA,励磁电流 $I_M$=500mA,检查霍尔元件二维标尺是否已紧固;将霍尔

元件置于磁场一端，调节水平方向标尺，使霍尔元件沿水平方向向磁场中心并另一端移动；用对称测量法测量移动中各点的 $U_H$，磁场边缘区域每隔 1.0mm 测量一次，磁场中心区域每隔 5.0mm 测量一次，各测 6 个点，并将测量数据填入表 3-9-4。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

1）测量磁场的磁感强度

**表 3-9-1 磁感强度的测量数据**

| $I_S$ | $B,I$ | $B,-I$ | $-B,-I$ | $-B,I$ | $U_H$/mV | $B$/T |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $U_1$/mV | $U_2$/mV | $U_3$/mV | $U_4$/mV | | |
| 3.00mA | | | | | | |

2）测定霍尔电压 $U_H$ 与工作电流 $I_S$ 的关系

**表 3-9-2 霍尔电压 $U_H$ 与工作电流 $I_S$ 关系的测量**

| $I_S$/mA | $B,I$ | $B,-I$ | $-B,-I$ | $-B,I$ | $U_H$/mV |
|---|---|---|---|---|---|
| | $U_1$/mV | $U_2$/mV | $U_3$/mV | $U_4$/mV | |
| 0.50 | | | | | |
| 1.00 | | | | | |
| 1.50 | | | | | |
| 2.00 | | | | | |
| 2.50 | | | | | |
| 3.00 | | | | | |

3）测定霍尔电压 $U_H$ 与励磁电流 $I_M$ 的关系

**表 3-9-3 霍尔电压 $U_H$ 与励磁电流 $I_M$ 关系的测量**

| $I_M$/mA | $B,I$ | $B,-I$ | $-B,-I$ | $-B,I$ | $U_H$/mV |
|---|---|---|---|---|---|
| | $U_1$/mV | $U_2$/mV | $U_3$/mV | $U_4$/mV | |
| 100 | | | | | |
| 200 | | | | | |
| 300 | | | | | |
| 400 | | | | | |
| 500 | | | | | |

4）测量磁场沿水平 $x$ 方向的分布

表 3-9-4　磁场沿螺线管轴向分布的测量数据

| $i$ | $x_i$/mm | $B,I$ | $B,-I$ | $-B,-I$ | $-B,I$ | $U_H$/mV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $U_1$/mV | $U_2$/mV | $U_3$/mV | $U_4$/mV | |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 11 | | | | | | |
| 12 | | | | | | |
| 13 | | | | | | |
| 14 | | | | | | |
| 15 | | | | | | |
| 16 | | | | | | |
| 17 | | | | | | |
| 18 | | | | | | |

5）记录所用实验仪器上的霍尔灵敏度 $K_H$=________。

**2. 数据处理（data processing）**

1）由表 3-9-1 的数据计算出霍尔电压 $U_H$，根据公式 $U_H=R_H\dfrac{IB}{d}=K_HIB$ 计算出磁感强度 $B$。

2）由表 3-9-2 的数据作 $U_H$-$I_S$ 曲线，以 $I_S$ 为横坐标，$U_H$ 为纵坐标，在坐标纸上作出 $U_H$-$I_S$ 曲线（为直线，即 $U_H=kI_S$）；重新在图上任取两点（$I_{1S}$，$U_{H1}$），（$I_{2S}$，$U_{H2}$），求出直线的斜率$k=\dfrac{U_{H2}-U_{H1}}{I_{2S}-I_{1S}}$，再根据式 $k=K_H\cdot B$ 计算 $I_M=500\text{mA}$ 时的磁感强度 $B$。

3）由表 3-9-3 的数据，以 $I_M$ 为横坐标，$U_H$ 为纵坐标，在坐标纸上作出 $U_H$-$I_M$ 曲线。

4）由表 3-9-4 的数据，根据式 $U_H=K_HIB$ 计算出各点的磁感强度 $B$，然后以 $x$ 为横坐标，$B$ 为纵坐标作出 $B$-$x$ 分布图。

## 六、注意事项（cautions）

1. 当霍尔片未连接到实验架，并且实验架与测试仪未连接好时，严禁开机加电，否则，极易使霍尔片遭受冲击电流而使霍尔片损坏。

2. 霍尔片性脆易碎、电极易断，严禁用手去触摸，以免损坏！在需要调节霍尔片位置

时,必须谨慎。

3. 加电前必须保证测试仪的"$I_S$ 调节"和"$I_M$ 调节"旋钮均置零位(即逆时针旋到底),严禁 $I_S$,$I_M$ 电流未调到零就开机。

4. 测试仪的"$I_S$ 输出"接实验架的"$I_S$ 输入","$I_M$ 输出"接"$I_M$ 输入"。决不能将"$I_M$ 输出"接到"$I_S$ 输入"处,否则一旦通电,会烧坏霍尔元件。

5. 注意:移动尺的调节范围有限!在调节到两边停止移动后,不可继续调节,以免因错位而损坏移动尺。

## 七、思考题(exercises)

1. 什么是霍尔效应、霍尔系数和霍尔灵敏度?
2. 哪些效应影响测量的准确性?实验中如何消除负效应对误差的影响?

**关键词(key words)**

霍尔电势差(Hall voltage),霍尔系数(Hall coefficient),霍尔元件(Hall element),工作电流(working current),磁场(magnetic field),电场(electric field),电子(electron)

# 实验十　牛顿环的干涉

光的干涉现象在现代精密测量技术中有很多重要应用，常用于检查物体表面的平面度、平行度；测定或估计微小长度、微小角度及其微小变化；研究材料及零部件的微小形变等。牛顿环的干涉实验是一种空气薄膜产生的等厚干涉实验，尽管实验原理并不复杂，却有不少著名物理学家从不同角度对它进行过细致研究，因而在历史上发挥过重要作用。

## 一、实验目的（experiment purpose）

1. 了解牛顿环等厚干涉的原理和观察方法；
2. 掌握用牛顿环测量平凸透镜曲率半径的原理方法；
3. 学会使用读数显微镜，认识光学实验中常用的一种单色光源——钠光灯；
4. 学会用逐差法处理实验数据。

## 二、实验原理（experimental principle）

牛顿环是一种典型的等厚干涉，是一种用分振幅方法实现的等厚干涉现象，最早为牛顿所发现。牛顿环是将一曲率半径较大的平凸玻璃透镜的凸面放在一块平板玻璃上构成的，如图 3-10-1 所示。

当一个曲率半径较大的平凸透镜的凸面放在一块平玻璃上，两者之间就形成了自中心向外逐渐变厚的空气薄层，当平行光垂直入射到牛顿环表面时，入射光在空气薄膜的上下表面反射的两束光是相干光，并存在光程差，它们在平凸透镜的凸面相遇后会产生干涉现象，干涉条纹是以 $O$ 为中心的明暗相间、内疏外密的同心圆环（图 3-10-2），称为牛顿环。由于同一干涉环上各处的空气层厚度是相同的，因此它属于等厚干涉。

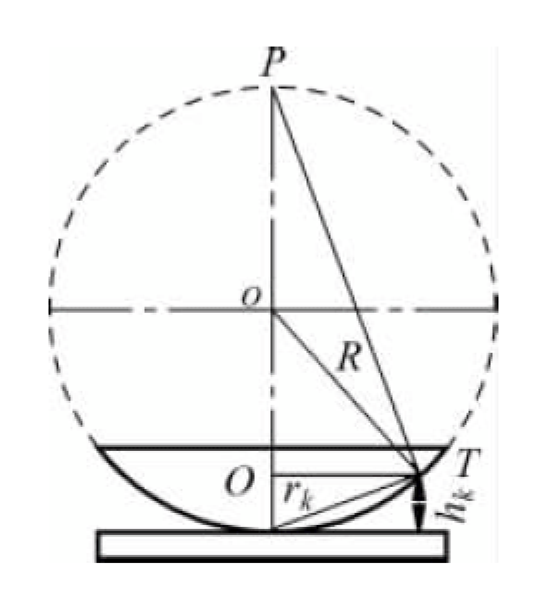



图 3-10-1　牛顿环

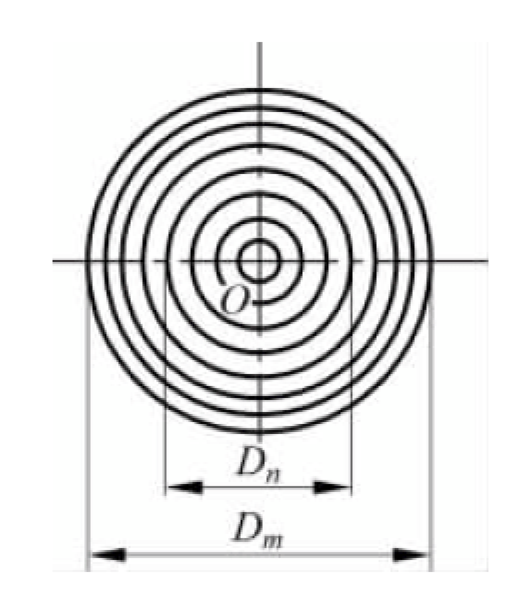



图 3-10-2　干涉条纹

由图 3-10-1 可见，如设透镜的曲率半径为 $R$，与接触点 $O$ 相距为 $r_k$ 处空气层的厚度为 $h_k$，则该处空气层上、下表面反射的光程差为

$$\Delta = 2h_k + \lambda/2 \qquad (3\text{-}10\text{-}1)$$

式中，$\lambda/2$ 是由于光从光疏介质入射到光密介质反射时发生半波损失而产生的附加光程差。当光程差满足

$$\Delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (k = 0,1,2,\cdots) \tag{3-10-2}$$

时，产生暗条纹，将式(3-10-1)代入式(3-10-2)后，得到暗条纹的空气间隙层厚度满足

$$2h_k = k\lambda \tag{3-10-3}$$

由此可见，接触点处 $h_k=0$，对应的是零级暗条纹，式中 $k$ 为干涉级次。

明条纹的光程差应满足 $\Delta=k\lambda(k=1,2,\cdots)$，它出现在空气间隙层厚度为 $2h_k=k\lambda-\dfrac{\lambda}{2}$ 处，由于一般测量时均使用暗条纹，所以对亮条纹不再详细阐述。

设透镜的曲率半径为 $R$，在空气薄膜的厚度为 $h_k$ 处产生的第 $k$ 级暗环的半径为 $r_k$，由图 3-10-1 可知

$$R^2 = r_k^2 + (R - h_k)^2 = r_k^2 + R^2 - 2Rh_k + h_k^2 \tag{3-10-4}$$

因为 $R \gg h_k$，所以 $h_k^2 \ll 2Rh_k$，可将 $h_k^2$ 从上式中略去，将式(3-10-3)代入式(3-10-4)后，得出暗条纹的半径为

$$r_k^2 = kR\lambda \quad (k = 0,1,2,\cdots) \tag{3-10-5}$$

由式(3-10-5)可知，当 $k=0$ 时，$r=0$，接触点为暗点，如果单色光源的波长 $\lambda$ 已知，测出第 $k$ 级的暗环的半径 $r_k$，就可以得出平凸透镜的曲率半径 $R$；反之，如果 $R$ 已知，测出 $r_k$ 后，就可计算出入射单色光波的波长。但用此测量关系式往往误差很大，原因在于凸面和平面不可能是理想的点接触；接触压力会引起局部变形，使接触面成为一个圆形平面，干涉环中心为一暗斑；或者空气间隙层中有了尘埃，附加了光程差，干涉环中心为一亮(或暗)斑。所以无法确定环的几何中心。因此比较准确的方法是测量干涉环的直径，并用逐差法计算两个不同级次的暗环直径 $D_m$，$D_n$ 的平方差来计算曲率半径 $R$。即将式(3-10-5)中的暗环半径 $r_k$ 用直径 $D_k$ 来表示，并取平方，有

$$D_k^2 = 4kR\lambda \tag{3-10-6}$$

分别取 $k$ 等于 $m$，$n$ 代入式(3-10-6)并相减，得

$$D_m^2 - D_n^2 = 4(m - n)\lambda R \tag{3-10-7}$$

因此，待测量的透镜的曲率半径为

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m - n)\lambda} \tag{3-10-8}$$

式(3-10-8)表明，两暗环直径的平方差只与它们相隔几个暗环的数目$(m-n)$有关，而与它们各自的级别无关。因此我们测量时，就可以用环数代替级数。用这种方法不但可以解决级数无法确定的困难，而且消除了由于接触点形变及微小灰尘产生的附加光程差。

由式(3-10-8)可见，在已知单色光波长 $\lambda$ 的情况下，只要测出第 $m$ 条暗环的直径 $D_m$，第 $n$ 条暗环的直径 $D_n$ 及环数差$(m-n)$，便可以计算出透镜的曲率半径 $R$。

## 三、实验仪器(experimental device)

读数显微镜、平凸透镜和平面玻璃组成的牛顿环装置、低压钠光灯

### 1. 读数显微镜的结构

如图 3-10-3 所示，目镜可用锁紧螺钉固定于任一位置，棱镜盒可在 360°方向上旋转，物镜

用丝扣拧入镜筒内，镜筒用调焦手轮完成调焦。转动测微鼓轮，显微镜沿导轨作纵向移动。

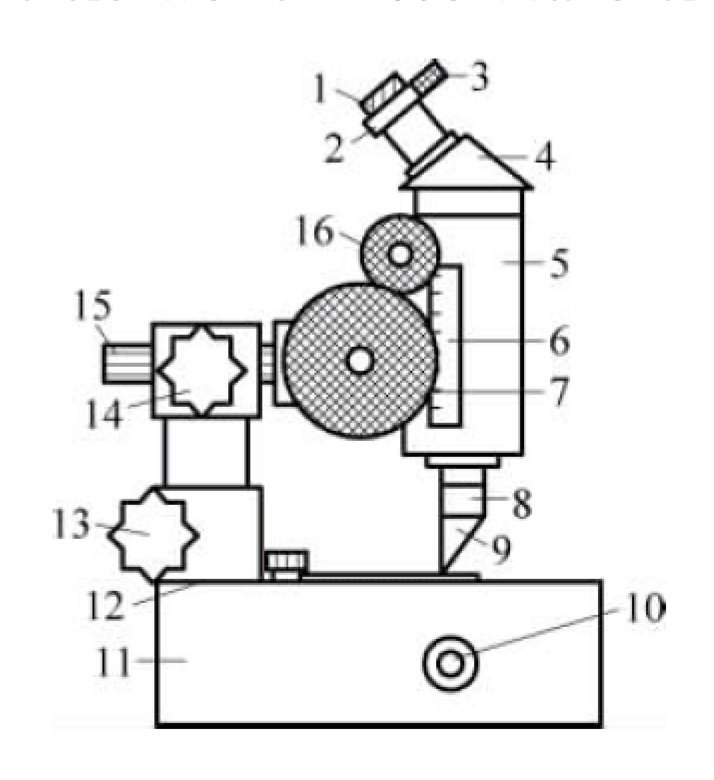



图 3-10-3　读数显微镜结构图

1—目镜；2—目镜座；3—锁紧螺钉；4—棱镜盒；5—镜筒；6—标尺；7—测微鼓轮；8—物镜；9—半反镜；10—手轮；11—底座；12—压板；13—大手轮；14—小手柄；15—支杆；16—调焦手轮

**2. 读数显微镜的使用方法**

(1) 将被测物放在工作平台上固定，旋转棱镜盒至最舒适的观察位置后，将其锁紧。

(2) 调节反光手轮 10 和半反镜 9，使读数显微镜有明亮的视场。

(3) 旋转目镜 1，使十字分划板清晰成像。

(4) 转动调焦手轮 16，使物镜 8 由下往上缓慢移动，使被测物在读数显微镜中清晰成像。

(5) 转动测微鼓轮 7，使十字分划板的竖直线对准被测物的起点，记下此时的数值 $L_1$；然后沿同一方向转动测微鼓轮，使十字分划板的竖直线对准被测物的终点，记下此时的数值 $L_2$，则所测长度为 $L=|L_2-L_1|$。

读数显微镜是较精密的测量仪器，使用时应小心谨慎，避免震动和碰撞；仪器应保持清洁、滑润。

(6) 读数

读数显微镜的读数由主尺读数和测微鼓轮读数两部分组成。主尺刻度每小格 1mm；测微鼓轮每转动一圈，显微镜在主尺上移动 1mm，鼓轮上有 100 个等分格，每格 0.01mm。测量值为主尺读数加鼓轮读数，主尺读数只读取整数位，测微鼓轮还必须估读一位。

## 四、实验内容(experimental content)

**1. 将读数显微镜、低压钠光灯、牛顿环装置调节好**

(1) 用手轻调牛顿环仪上的三个螺钉，使牛顿环位于其中心。螺钉不要调得太紧(会压坏玻璃)，也不要调得太松(牛顿环不稳定，容易移动，无法准确进行测量)。此时，用肉眼可以看到很小的干涉圆环。

(2) 将牛顿环装置放在读数显微镜工作平台上，调测微鼓轮 7 使镜筒位于标尺中部(约 25mm 处)，牛顿环装置中心接触点(肉眼看到的干涉圆环)对准读数显微镜的半反射镜。

(3) 接通钠光灯光源，调整钠光灯的位置使钠光灯发出的光线($\lambda=5.893\times10^{-7}$m)射到半反射镜 G 上，经半反射镜 G 反射垂直照射到牛顿环装置上。

(4) 调节读数显微镜的目镜,使视场中的十字叉丝清晰。

(5) 略微转动半反射镜,可全方位转动(上、下、左、右),使光线垂直入射到牛顿环装置上,这时从显微镜中观察到一片均匀明亮的钠黄灯。

(6) 转动调焦手轮(使镜筒自下而上缓慢调节,以免显微镜的物镜与牛顿环相撞而损坏仪器),调到某一位置即可见清晰的牛顿环干涉图像。

(7) 调节牛顿环的位置,使目镜中十字叉丝的交点与干涉条纹的环心大致地对准,该调节可通过调节平台横向千分尺和纵向千分尺来改变,也可用手直接移动牛顿环装置。

(8) 转动测微鼓轮,使显微镜移动,同时观察目镜中的十字叉丝是否有一条与镜筒移动方向垂直,而另一条与镜筒移动方向平行,若不符,则旋松锁紧螺钉,适当转动目镜,使之达到上面所述的工作状态。

**2. 用牛顿环测平凸透镜的曲率半径**

(1) 转动测微鼓轮,使显微镜的镜筒向某一方向移动(如右移),同时由中心零级暗斑开始数移过去的环数,依顺序数到第 35 暗环,然后反向转动测微鼓轮到第 30 环,并使十字叉丝竖线与环的外侧相切,记下此位置测微鼓轮的数值 $x_k$,然后继续沿同一方向转动鼓轮,使叉丝依次与第 29 环到第 25 环、第 20 环到第 15 环等暗环的外侧相切,顺次记下各环的读数 $x_k$。

(2) 再继续沿同一方向转动测微鼓轮,十字叉丝经过中心零级暗斑后依次与另一侧(如左侧)的第 15 环到第 20 环、第 25 环到第 30 环等暗环内侧相切时,顺次记录各环相应的读数 $x'_k$,将读数填入表 3-10-1 中。

**注意**:测量时鼓轮只能沿一个方向转动,中途不能倒退,即不能改变方向,只沿一个方向移动,以消除螺纹的间隙误差,否则要重测。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

**表 3-10-1 测量牛顿环直径的数据**

| | $x_k$ | $x'_k$ | $D_k=\|x_k-x'_k\|$ | $D_k^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 第 30 环 | | | | |
| 第 29 环 | | | | |
| 第 28 环 | | | | |
| 第 27 环 | | | | |
| 第 26 环 | | | | |
| 第 25 环 | | | | |
| 第 20 环 | | | | |
| 第 19 环 | | | | |
| 第 18 环 | | | | |
| 第 17 环 | | | | |
| 第 16 环 | | | | |
| 第 15 环 | | | | |

### 2. 数据处理(data processing)

(1) 将实验测得的数据代入公式 $D_k=|x_k-x'_k|$ 中,计算出对应环数的直径。

(2) 根据计算出的 $D_k$ 值，算出相应的 $D_k^2$ 值。

(3) 用逐差法求 $D_m^2-D_n^2$ 的值，即依次计算 $(D_{30}^2-D_{20}^2)$，$(D_{29}^2-D_{19}^2)$，…，$(D_{25}^2-D_{15}^2)$ 的值，然后根据式 $\overline{D_m^2-D_n^2}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{6}(D_m^2-D_n^2)_i\ (N=6)$，求出 $\overline{D_m^2-D_n^2}$。

(4) 由式 $\bar{R}=\frac{\overline{D_m^2-D_n^2}}{4(m-n)\lambda}$ 求出透镜的曲率半径 $\bar{R}$，式中 $m-n=10$。

(5) 由式 $u_R=\frac{u_{D_m^2-D_n^2}}{4(m-n)\lambda}$ 计算曲率半径 $R$ 的不确定度（只计算 A 类不确定度），由于

$$u_{D_m^2-D_n^2}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}[(D_m^2-D_n^2)_i-\overline{D_m^2-D_n^2}]^2}{N(N-1)}}\quad (N=6)$$

则可推出

$$u_R=\frac{1}{4(m-n)\lambda}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}[(D_{mi}^2-D_{ni}^2)-\overline{D_m^2-D_n^2}]^2}{N(N-1)}}$$

(6) 曲率半径结果表示：$R=\bar{R}\pm u_R$。

## 六、注意事项(cautions)

1. 测量过程中，鼓轮应沿同一方向转动，不可中途倒转，以消除螺纹间隙误差。
2. 对物镜调焦时，应先将读数显微镜的镜筒置于最低点，转动调焦手轮，使镜筒自下而上缓慢调节，以免显微镜的物镜与牛顿环相碰损坏仪器。
3. 读数环数时一定要细心耐心，数错时必须重新数起，否则会大大影响测量结果。
4. 在测量牛顿环直径时，注意左右两侧的环数不能数错，且十字叉丝中心应过牛顿环暗纹的中心。
5. 牛顿环装置和显微镜的光学表面不清洁时，要用专门的擦镜纸轻轻擦拭。
6. 实验完毕后，应将牛顿环装置的调节螺丝松开，以免凸透镜变形。

## 七、思考题(exercises)

1. 若用白光照射牛顿环，能否看到干涉条纹？牛顿环会有什么特征？
2. 使用读数显微镜要注意哪些问题？
3. 实验中为什么测牛顿环直径而不测半径？如何保证测出的是直径而不是弦长？
4. 牛顿环干涉条纹的中心在什么情况下是暗斑？什么情况下是亮斑？

**关键词(key words)**

牛顿环(Newton's rings)，等厚干涉(equal thickness interference)，相位差(the phase difference)，光程差(optical length difference)，读数显微镜(reading microscope)，半波损失(half-wavelength lost)，曲率半径(radius of curvature)，逐差法(difference method)

# 实验十一 分光计的调整和折射率的测定

分光计是一种精确测量角度的仪器，也称测角仪。它直接测出反射角、透明物质的折射角、光栅的衍射角等，也可用来测量折射率、光波的波长和观察光谱等。

折射率是物质重要特性参数，也是光学品质的重要指标之一，能借以了解物质的光学性能、纯度、浓度以及色散大小等，因此折射率应用广泛，是石油、日化、油脂等工业中不可缺少的技术指标。测量折射率的方法很多，分光计的最小偏向角法是常用方法之一。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 了解分光计的结构和原理，学会分光计的调节与使用方法；
2. 学会测定三棱镜顶角和最小偏向角的方法；
3. 学会用最小偏向角法测定棱镜玻璃的折射率。

## 二、实验原理（experimental principle）

### 1. 自准直法测量三棱镜的顶角（measuring triple prism's apex angle by autocollimation method）

将分光计调整（调节方法见实验内容）好后，按图 3-11-1 所示将三棱镜放在载物台上，即使三棱镜 $ABC$ 的三个面分别与载物台下面的三个螺钉 $B_1$，$B_2$，$B_3$ 的连线两两垂直。转动平台使 $AB$ 面正对望远镜；由于 $AC$ 面与 $B_1$，$B_3$ 的连线垂直，所以 $B_1$，$B_3$ 不动，只调节螺钉 $B_2$，使 $AB$ 面与望远镜光轴垂直（$B_2$ 对 $AC$ 面的倾斜没有影响）；然后使 $AC$ 面正对望远镜，因为 $AB$ 面与 $B_1$，$B_2$ 的连线垂直，所以 $B_1$，$B_2$ 不动，只调节螺钉 $B_3$，使 $AC$ 面与望远镜光轴垂直（$B_3$ 对 $AB$ 面的倾斜没有影响）；再将 $AB$ 面正对望远镜，调节螺钉 $B_2$；如此反复调节螺钉 $B_2B_3$，直到两个侧面反射回的叉丝像都能位于分划板的上十字准线中心处为止，此时三棱镜的主截面垂直于分光计转轴。

测出 $AB$，$AC$ 面法线方向的夹角 $\varphi$（见图 3-11-2），可得三棱镜的顶角，即

$$\alpha = 180° - \varphi \tag{3-11-1}$$

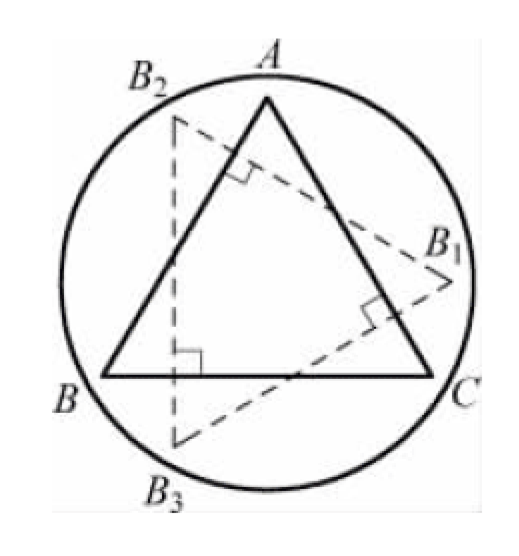



图 3-11-1 三棱镜的放置

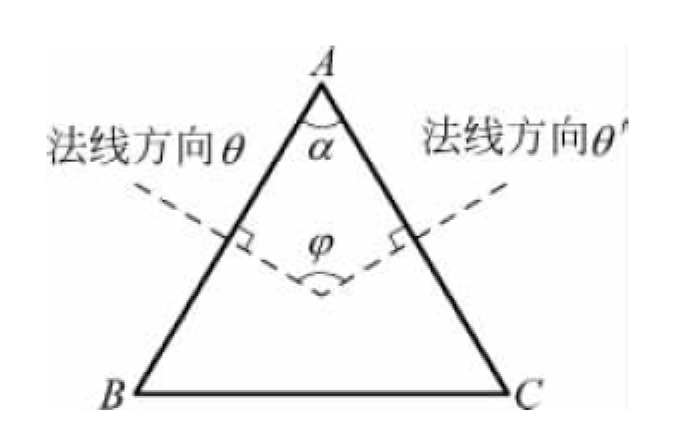



图 3-11-2 测量三棱镜的顶角

**2. 用最小偏向角法测三棱镜玻璃的折射率(measuring refractive index of triple prism by minimum deviative angle method)**

如图 3-11-3 所示，入射光线与出射光线的夹角为 $\delta$，称为棱镜的偏向角。当入射光波长和棱镜顶角一定时，偏向角 $\delta$ 随入射角 $i_1$ 的变化而变化。理论可以证明，当入射角 $i_1$ 等于出射角 $i_4$ 时，偏向角 $\delta$ 最小，称为最小偏向角，用 $\delta_{\min}$ 表示。

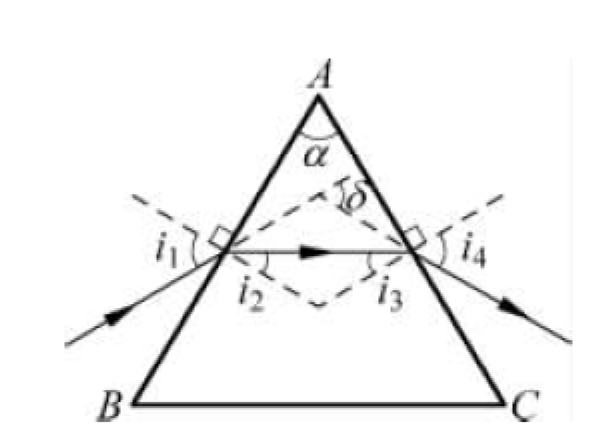


图 3-11-3　用最小偏向角法测三棱镜玻璃的折射率的测量原理

由图 3-11-3 中的几何关系，可以证明

$$i_1 = \frac{\delta_{\min} + \alpha}{2}, \quad i_2 = \frac{\alpha}{2} \qquad (3\text{-}11\text{-}2)$$

根据折射定律，棱镜玻璃的折射率 $n$ 为

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta_{\min} + \alpha)}{\sin \frac{\alpha}{2}} \qquad (3\text{-}11\text{-}3)$$

只要测出三棱镜的顶角 $\alpha$ 及最小偏向角 $\delta_{\min}$，就可计算出棱镜玻璃的折射率。

## 三、实验仪器(experimental device)

实验仪器主要有分光计、三棱镜、钠光灯等。

下面介绍分光计的结构(the structure of spectrometer)。

分光计主要由望远镜、平行光管、载物台、分度盘及游标盘组成，其结构如图 3-11-4 所示。

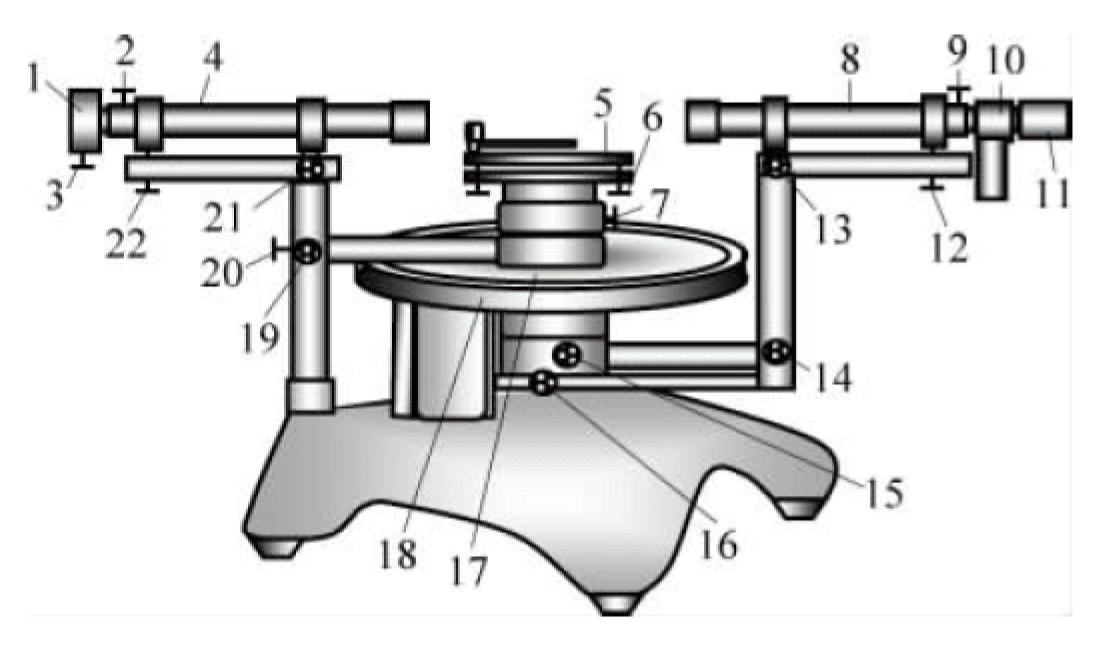


图 3-11-4　分光计结构图

1—狭缝；2—狭缝锁紧螺钉；3— 狭缝宽度调节螺钉；4—平行光管；5—载物台；6—载物台调平螺钉；7—载物台锁紧螺钉；8—望远镜；9—望远镜锁紧螺钉；10—自准直目镜；11—目镜视度调节手轮；12— 望远镜光轴高低调节螺钉；13—望远镜光轴水平调节螺钉；14—望远镜微调螺钉；15—望远镜锁紧螺钉；16—分度盘与望远镜固联螺钉；17—游标盘；18—分度盘；19—游标盘微调螺钉；20—游标盘制动螺钉；21—平行光管光轴水平调节螺钉；22—平行光管光轴高低调节螺钉

(1) 望远镜

望远镜作观测用，它由物镜、自准直目镜和测量用十字准线(即分划板刻线)组成。分划板刻有十字叉丝，打开目镜照明小灯，可在目镜视场看到带有十字叉丝的绿色窗；望远镜可通过调节螺丝进行高低与水平的调节。

（2）平行光管

平行光管的作用是产生平行光。平行光管的一端装有消色差的复合正透镜，另一端装有可伸缩的套管，套管的末端装有宽度可调的狭缝。当狭缝调到物镜的焦平面上时，由狭缝射出的光线经物镜便成为平行光。

（3）载物台

载物台是一个用来放置棱镜、光栅等光学元件的旋转平台，它套在游标盘上。平台下有3个调平螺钉，用来调节平台高度及平台与中心转轴的倾斜度；载物台可单独转动，也可与游标盘固联一起同步转动。

（4）读数圆盘

读数圆盘用来确定望远镜旋转角度，它由分度盘与游标盘组成。测量时分度盘应与望远镜同步转动，游标盘应与载物台同步转动。分度盘被等分为720格，每格为0.5°，即30′；游标盘游标的最小分度值为1′（读数方法参照游标卡尺读数原理），如图3-11-5所示的读数应为150°38′。为了消除游标盘和分度盘的圆心与仪器中心轴的轴心不重合所引起的偏心差，游标盘设有两个游标。

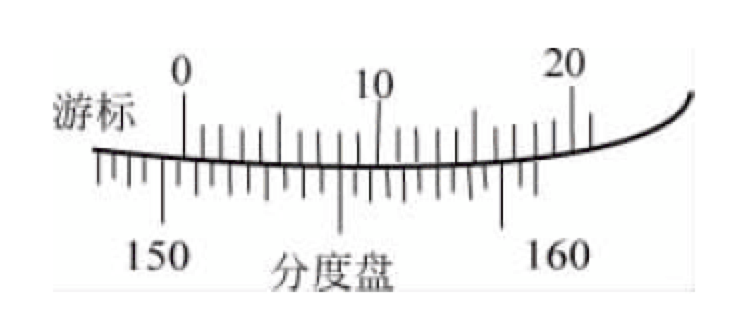



图3-11-5　读数圆盘示意图

## 四、实验内容（experimental content）

### 1. 分光计的调节（adjusting spectrometer）

调节分光计前，应熟悉分光计的各部件及各螺钉的作用和用法。

调节要求：望远镜能接收平行光，且其轴线垂直中心转轴；载物台平面水平且垂直于转轴；平行光管产生平行光且其轴线垂直于中心转轴。

1）粗调

仔细用眼睛对分光计进行观察调节，调节望远镜、平行光管和载物台，使三者大致垂直于分光计的中心转轴；此步是进一步细调的基础。

2）自准直法调节望远镜

（1）调节目镜：打开目镜照明灯，根据观察者视力的情况，转动目镜调焦手轮，使分划板在目镜视场中清晰成像。

（2）调节望远镜光轴与分光计转轴垂直：将平面镜按图3-11-6放置在载物台上，望远镜对准平面镜；慢慢转动载物台，调节载物台调平螺钉（$B_1$ 或 $B_2$）以及望远镜光轴高低调节螺钉（图3-11-4中的12），使在目镜中能清楚地观察到由平面镜反射回来的绿色十字叉丝像，并左右移动眼睛，观察十字叉丝像与分划板是否有视差；用“各半调节法”使十字叉丝像位于分划板上十字线中心（见图3-11-7）。具体方法如下：调节载物台调平螺钉 $B_1$ 或 $B_2$，使十字叉丝像与上十字线中心的距离减小一半，然后调节望远镜光轴高低调节螺钉（图3-11-4中的12），使十字叉丝像位于分划板上十字线中心；将载物台旋转180°，使平面镜的另一面对准望远镜，重复上述步骤；反复重复调节，直到平面镜的任意一面反射回来的十字叉丝像都位于分划板上十字线中心的位置，且无视差为止；此时，望远镜的光轴与分光计转轴垂直。调好后，望远镜的调平螺钉不可再动。

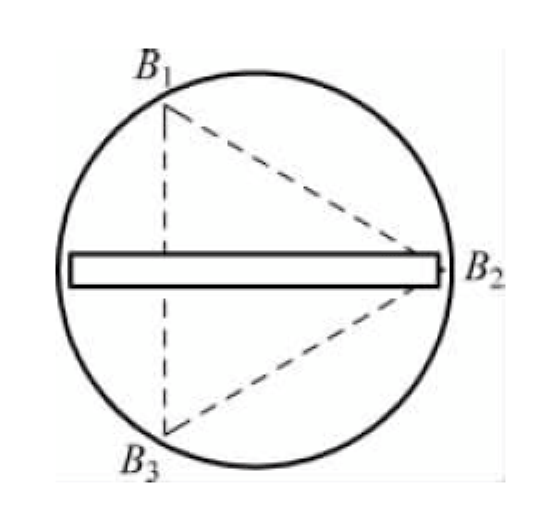


图 3-11-6　平面镜的放置

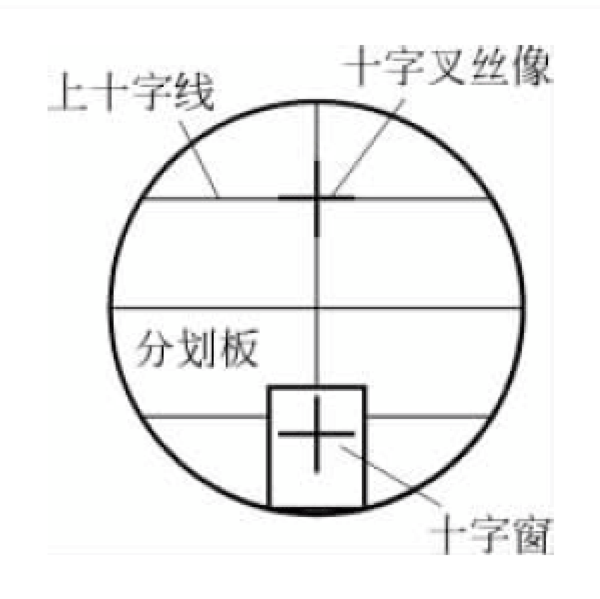


图 3-11-7　十字叉丝的调节

3）调节平行光管产生平行光，并垂直分光计中心转轴

(1) 用已调好的望远镜作为标准，正对着平行光管，调节狭缝与透镜间的距离，使狭缝正好位于物镜的焦平面上，这样从望远镜中会观察到一条清晰的狭缝像，同时狭缝与十字叉丝没有视差，说明平行光管产生平行光。调节狭缝的宽度，使其约为 1mm。

(2) 调节平行光管的光轴水平调节螺钉（图 3-11-4 中的 21），使狭缝像中心与分划板竖直准线重合（图 3-11-8），则平行光管的光轴垂直于分光计的中心转轴。

4）调整载物台无侧倾

转动载物台，用望远镜观察十字叉丝像的横向移动，若十字叉丝像的移动不是沿着分划板的横向准线，则载物台侧倾；调节载物台调平螺钉 $B_3$，直到载物台无侧倾为止（也可将平面镜如图 3-11-9 所示放置，通过调节 $B_3$，使十字叉丝像位于分划板上十字线中心，则载物台无侧倾）。



图 3-11-8　狭缝像的位置

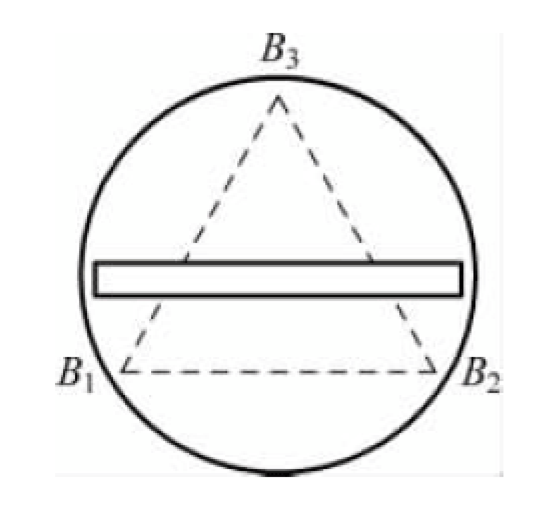


图 3-11-9　平面镜的放置

分光计调节完毕后，将载物台与游标盘固联并锁紧固定；将望远镜与分度盘固联；转动望远镜，通过分度盘与游标盘构成的读数装置便可以测量角度。

**2. 测量三棱镜的顶角（measuring triple prism's apex angle）**

1）固定载物台，锁紧分度盘制动螺钉，将望远镜对准 $AB$ 面，锁紧望远镜转动螺钉，调节望远镜转动微调，使由 $AB$ 面反射回来的叉丝像位于分划板上十字准线中心处，记下分度盘两游标的读数 $\theta_1$，$\theta_1'$；

2）松开望远镜的锁紧螺钉，将望远镜对准 $AC$ 面，再锁紧望远镜转动螺钉，调节望远镜转动微调，使由 $AC$ 面反射回来的叉丝像位于分划板上十字准线中心处，记下分度盘两游标的读数 $\theta_2$，$\theta_2'$；

3）重复步骤 1)、2)的测量各 3 次，将数据填入表 3-11-1 中。

**3. 最小偏向角法测三棱镜玻璃的折射率(measuring refractive index of triple prism by minimum deviation angle method)**

1) 将三棱镜按图 3-11-10 的方式放在载物台上,使棱镜的 $AB$ 面正对望远镜,与平行光管轴线垂直,$BC$ 面与平行光管轴线几近平行;由于偏向角 $\delta$ 只是入射角 $i_1$ 的函数,因此通过不断连续改变入射角 $i_1$,同时观察出射光线的方位变化,可以确定最小偏向角 $\delta_{min}$ 的位置。入射角 $i_1$ 在不断连续变化时,出射光线的方位也随之向某一方向变化;当 $i_1$ 变化到某一值时,出射光线方位的变化会发生停滞,并随之反向移动;出射光线即将反向移动的位置就是最小偏向角所对应的方位。

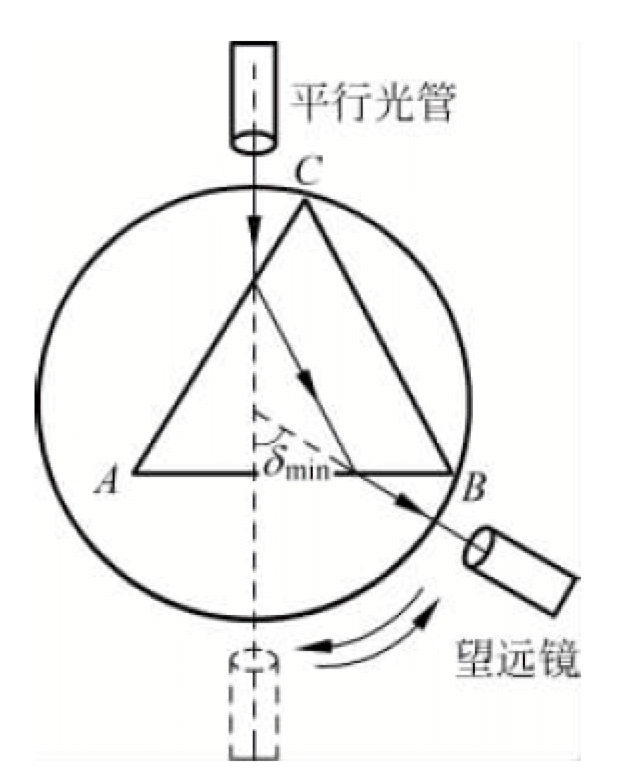



图 3-11-10　测量最小偏向角

2) 测定最小偏向角 $\delta_{min}$

使棱镜的 $AB$ 面正对望远镜且垂直平行光管轴线后,锁紧分度盘,根据折射定律判断折射光线的出射方向,用眼睛观察并找到出射光线,然后转动载物台,观察出射光线的移动情况。若看到出射光线向偏向角减小的方向移动时,继续沿此方向转动载物台;当看到载物台转至某一位置时,出射光线突然向偏向角增大的方向移动,出射光线的这一位置就是偏向角 $\delta_{min}$ 的方位。将望远镜移至该位置对准出射光线观察并进行微调,使分划板的竖直准线对准此位置(即狭缝像中央),记录此时游标 1 和游标 2 的读数 $\theta_i$,$\theta_i'$;保持分度盘固定,取下三棱镜,将望远镜移至对准平行光管的位置,微调望远镜使分划板的竖直准线对准入射光线(即狭缝像中央),记录游标 1 和游标 2 的读数 $\theta_0$,$\theta_0'$;此时的入射光线与出射光线的方位差即为最小偏向角 $\delta_{min}$;重复上述测量三次,数据填入表 3-11-2 中。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

**表 3-11-1　测量三棱镜顶角的实验数据**

| 测量次数 | $\theta_1$ | $\theta_1'$ | $\theta_2$ | $\theta_2'$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 平均值 | | | | |

**表 3-11-2　测定最小偏向角的实验数据**

| 测量次数 | $\theta_i$ | $\theta_i'$ | $\theta_0$ | $\theta_0'$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |

**2. 数据处理(data processing)**

1) 用自准直法测三棱镜顶角的实验数据(表 3-11-3)

**表 3-11-3 测三棱镜顶角的实验数据**

| 角位置 | 平均值 | $\varphi_1,\varphi_2$ | $\varphi=(\varphi_1+\varphi_2)/2$ | $\alpha=180°-\varphi$ |
|---|---|---|---|---|
| $\theta_1$ | | | | |
| $\theta_1'$ | | | | |
| $\theta_2$ | | | | |
| $\theta_2'$ | | | | |

表中

$$\varphi_1 = |\theta_1' - \theta_1|,\quad \varphi_2 = |\theta_2' - \theta_2|$$

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{|\theta_1' - \theta_1| + |\theta_2' - \theta_2|}{2}$$

三棱镜的顶角

$$\alpha = 180° - \varphi$$

2) 用最小偏向角法测折射率的实验数据(表 3-11-4)

**表 3-11-4 测三棱镜最小偏向角的实验数据**

| 角位置 | 平均值 | $\delta,\delta'$ | $\bar{\delta}=(\delta+\delta')/2$ |
|---|---|---|---|
| $\theta_0$ | | | |
| $\theta_i$ | | | |
| $\theta_0'$ | | | |
| $\theta_i'$ | | | |

表中

$$\delta = |\theta_0 - \theta_i|,\quad \delta' = |\theta_0' - \theta_i'|$$

$$\delta = \frac{1}{2}(\delta + \delta') = \frac{|\theta_0 - \theta_i| + |\theta_0' - \theta_i'|}{2}$$

3) 计算棱镜玻璃的折射率

根据
$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\delta_{\min} + \alpha)}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

计算棱镜玻璃对单色钠黄光的折射率。

## 六、注意事项(cautions)

1. 必须认真调节好分光计,这是消除系统误差的关键。

2. 按要求正确摆放三棱镜,同时正确使用望远镜微调螺丝,方能准确对准观测光线。

3. 由于制造的原因,分光计的主轴不可能完全准确地在分度盘的圆心上,因此望远镜转过的真实角度与分度盘反映出的角度有偏差,称为偏心差;为消除这种系统误差,分光计

上设置了两个游标尺,望远镜的方位角 $\varphi_1$,$\varphi_2$ 由两游标尺读数的平均值确定,即

$$\varphi_1 = |\theta_2 - \theta_1|, \quad \varphi_2 = |\theta'_2 - \theta'_1|$$

则望远镜转过的角度 $\varphi$ 为

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{|\theta_2 - \theta_1| + |\theta'_2 - \theta'_1|}{2}$$

4. 用游标读角度值时,要注意观察望远镜是否经过分度盘的零点,即 360°的位置。例如,望远镜由 $\theta_1 = 355°45'$ 的位置转到 $\theta_2 = 115°43'$ 的位置,这一转动过程中望远镜经过了分度盘的零点,即 360°的位置,则望远镜转过的角度 $\varphi$ 应按 $\varphi = (360° + \theta_2) - \theta_1$ 计算。

## 七、思考题(exercises)

1. 分光计精细调节应满足哪几点要求?怎样判断是否已调好?
2. 分光计为何设置用两个游标读数?

**关键词(key words)**

分光计(spectrometer),三棱镜(triple prism),折射率(refractive index),最小偏向角(minimum deflection angle),测量(measurement)

# 实验十二　用衍射光栅测波长

衍射光栅简称光栅，是利用单缝衍射和多缝干涉原理制成一种光学元件。光栅常用在单色仪、光谱仪、摄谱仪等光学仪器中，作分光元件，用来研究谱线结构、谱线的波长和强度，进而研究物质的结构、做定量分析等。光栅还广泛应用于光学计量、光通信信息处理、光计算机中作分光和耦合元件。因此研究衍射现象及规律具有重要的理论和实践意义。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 进一步掌握分光计的调节与使用方法；
2. 了解光栅的主要特性及其应用；
3. 观察衍射光栅的衍射现象，掌握用分光计测量波长的方法。

## 二、实验原理(experimental principle)

衍射光栅是根据单缝衍射和多缝干涉原理制成的一种光学元件，衍射光栅具有很高的分辨本领，广泛用于光谱分析和分光光度的测量。常见衍射光栅每厘米的刻线数有几百到上万条，即光栅常数为 $10^{-4}$～$10^{-6}$m 数量级。衍射光栅可分为透射光栅和反射光栅，本实验用透射光栅，它是在光学玻璃片上刻划大量相互平行、宽度和间距相等的刻痕，刻痕外不透明，刻痕之间透明，起狭缝作用。

当一束单色平行光垂直照射到衍射光栅平面时，通过每个狭缝的光都能发生衍射，而衍射光通过透镜后便相互干涉。根据光栅衍射理论，产生衍射明条纹的条件为

$$d\sin\varphi = \pm k\lambda \quad (k = 0,1,2,\cdots) \tag{3-12-1}$$

上式称为光栅方程，式中 $d$ 为光栅常数，包括透明的部分 $b$，不透明部分 $b'$，即 $d=b+b'$，$\lambda$ 为入射光的波长，$k$ 为光谱级数，$\varphi$ 为 $k$ 级谱线的衍射角，如图 3-12-1 所示。

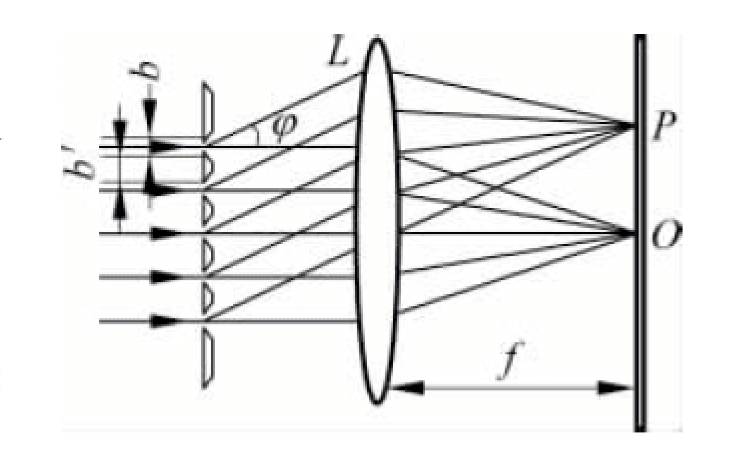


图 3-12-1　光栅衍射

光栅方程是产生衍射明条纹的条件，由方程可以看出，当 $k=0$ 时，在对应于衍射角 $\varphi=0$ 的中央处可以观察到中央(零级)明条纹，$k=1,2,\cdots$ 分别称为一级、二级……明条纹，正负号表示各级明条纹在中央(零级)明条纹两侧对称分布，称为谱线；若入射光为复色光，根据光栅方程可以看出，在 $\varphi=0(k=0)$ 处，各波长谱线重叠在一起，形成与复色光颜色相同的中央明条纹。在中央明条纹的两侧，对称分布着 $k=1,2,\cdots$ 级光谱，各级光谱按波长大小依次排列，形成一组由紫光到红光的彩色谱线，称为光栅谱线。图 3-12-2 为汞灯的衍射光谱示意图。对于同一级次，波长短的谱线在中央明条纹里侧，波长长的谱线在中央明条纹外侧；若已知光栅常数 $d$，测出待测谱线的衍射角 $\varphi$ 和相应级次 $k$，根据光栅方程可计算其波长 $\lambda$。表 3-12-1 为汞灯可见光部分光谱。

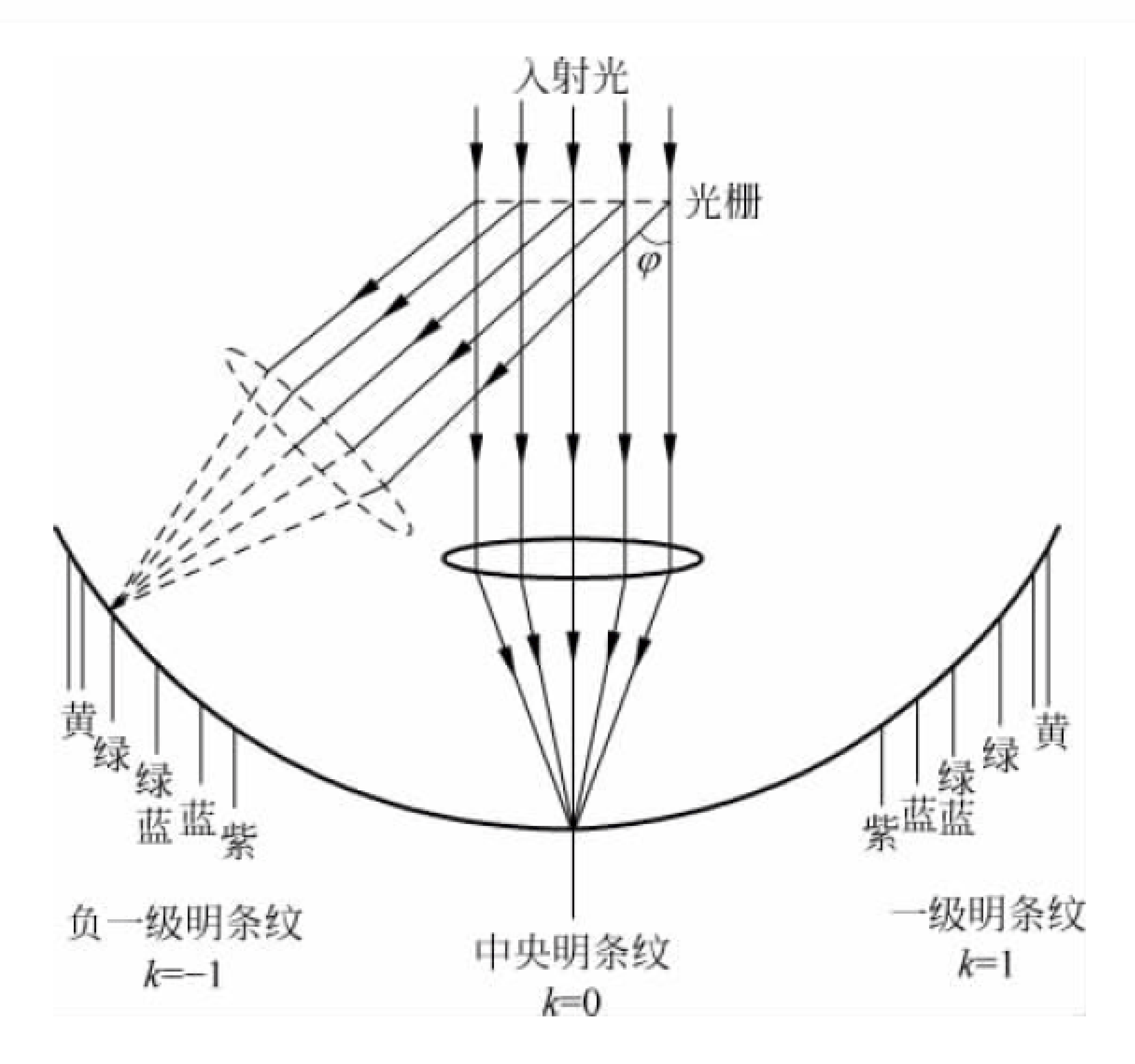



图 3-12-2 汞灯衍射光谱示意图

**表 3-12-1 汞灯可见光部分光谱**

| | 橙 | 黄 | 黄 | 绿 | 绿蓝 | 蓝 | 蓝紫 | 紫 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 波长/nm | 623.44 | 579.07 | 576.96 | 546.07 | 491.60 | 435.83 | 407.78 | 404.66 |
| 强度 | 很强 | 很强 | 很强 | 很强 | 一般 | 很强 | 较弱 | 一般 |

## 三、实验仪器(experimental device)

分光计、衍射光栅、汞灯、平面镜。

## 四、实验内容(experimental content)

**1. 调整分光计(adjusting spectrometer)**

打开汞灯,调节望远镜使其能接收平行光,且其光轴与分光计转轴垂直;调整载物台平面水平且垂直于中心轴;调节平行光管使之发出平行光,并使其光轴与望远镜等高同轴;调节平行光管的狭缝,使狭缝像宽约 0.5mm。(分光计的调节与使用见实验十一)

**2. 调整衍射光栅(adjusting diffraction grating)**

(1) 将平面镜按图 3-12-3 所示放置在载物台上,尽可能使平面镜平面垂直平分载物台调平螺丝 $B_1$,$B_2$ 的连线 $B_1B_2$;调节目镜焦距,使能清楚看到分划板的双十字准线;将望远镜对准平面镜,打开目镜照明灯,照亮绿色十字窗;从目镜里找到被平面镜反射回来的绿色十字叉丝像,采用“各半调节法”进行多次调节,使平面镜前后两个镜面反射回来的十字叉丝像均位于分划板上十字线的中心位置(见图 3-12-4),则平面镜的平面垂直于望远镜的光轴,也同时垂直于平行光管的光轴(注:此步调节也可直接使用衍射光栅)。

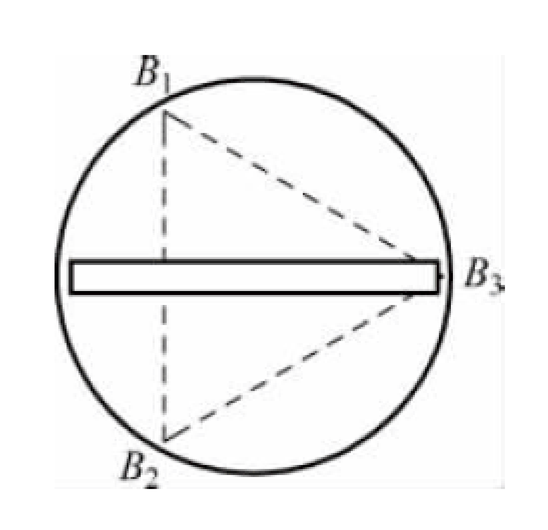




图 3-12-3　平面镜的放置

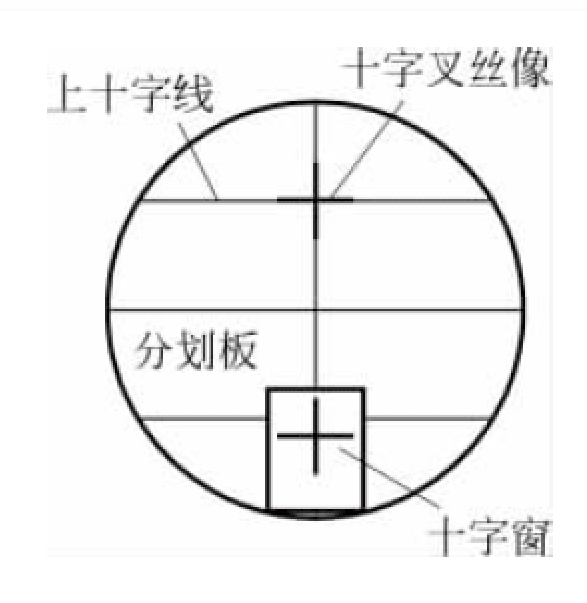



图 3-12-4　衍射光栅的调节

（2）取下平面镜，换上衍射光栅，并使光栅狭缝平行于分光计转轴。转动望远镜，观察各级光谱，若两侧的明条纹不等高，则说明光栅狭缝与平行光管的狭缝不平行；调节调平螺钉 $B_3$（保持 $B_1$，$B_2$ 不动），使两侧的明条纹等高；然后检查光栅平面是否仍保持与转轴平行，如果有变化，则应反复调整，直到 1）、2）同时满足为止。

**3. 测量衍射角（measuring diffraction angle）**

转动望远镜（分度盘跟望远镜一起），观察零级、一级和二级谱线；将十字叉丝的竖直线与±1 和±2 级各谱线重合（只测黄 1、黄 2、绿、蓝谱线），测出各谱线的角位置 $\theta_k$；在分度盘上读数时，应同时记录左右两游标的数 $\theta_k$，$\theta'_k$，填入表 3-12-2 中。

## 五、数据记录及处理（data recording and processing）

**1. 数据记录（data recording）**

**表 3-12-2　衍射光栅测量数据**

| | −2 级 | | −1 级 | | 1 级 | | 2 级 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\theta_{-2}$ | $\theta'_{-2}$ | $\theta_{-1}$ | $\theta'_{-1}$ | $\theta_1$ | $\theta'_1$ | $\theta_2$ | $\theta'_2$ |
| 黄 1 | | | | | | | | |
| 黄 2 | | | | | | | | |
| 绿 | | | | | | | | |
| 蓝 | | | | | | | | |

**2. 数据处理（data processing）**

（1）分别算出黄 1、黄 2、绿、蓝谱线的平均衍射角，某一谱线第 $k$ 级的平均衍射角按下式计算

$$\bar{\varphi}_k = \frac{1}{2}\left(\frac{|\theta_k - \theta_{-k}|}{2} + \frac{|\theta'_k - \theta'_{-k}|}{2}\right) \quad (k = 1,2)$$

（2）根据光栅方程 $d\sin\varphi = \pm k\lambda (k=0,1,2,\cdots)$，计算各谱线的波长，其中本实验的光栅为 300 刻线/mm，即光栅常数 $d=\frac{1}{300}$mm。

（3）把相关数值填入表 3-12-3 中，并与给定的各谱线波长比较（黄 1—579.07nm；黄 2—576.96nm；绿—546.07nm；蓝—435.83nm）。

（4）分析误差的原因（表 3-12-3）。

表 3-12-3　衍射光栅计算数据

| | $\bar{\varphi}_1$ | $\bar{\varphi}_2$ | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\bar{\lambda}=\frac{\lambda_1+\lambda_2}{2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 黄 1 | | | | | |
| 黄 2 | | | | | |
| 绿 | | | | | |
| 蓝 | | | | | |

## 六、注意事项（cautions）

1. 分光计是精密光学仪器，要倍加爱护，在制动螺钉锁紧后，不要强行转动望远镜。
2. 不得随意摆弄平行光管，不要随意拧动平行光管上的狭缝。
3. 光栅是精密光学器件，严禁用手触摸刻痕，以免弄脏或损坏。
4. 汞灯能辐射较强的紫外线，不要直接注视，以免灼伤眼睛。

## 七、思考题（exercises）

1. 单色平行光垂直照射到衍射光栅平面时，产生衍射明条纹的条件是什么？

2. 用光栅观察自然光，看到什么现象？为什么紫光离中央零级明纹最近，红光离零级明纹最远？

3. 光狭缝太宽或太窄时，将会出现什么现象？为什么？

**关键词（key words）**

光栅（grating），光栅常数（grating constant），分光计（spectrometer），衍射（diffraction），谱线（spectral lines）

# 实验十三　迈克尔孙干涉仪

迈克尔孙干涉仪是精密光学测量中精度非常高的仪器，在近代物理和计量技术中有着广泛应用。用迈克尔孙干涉仪可以观察光的干涉现象，测量各种单色光的波长以及测量微小长度(作为测长仪，精度可达亿分之一米)等。它是 1981 年美国物理学家迈克尔孙与合作者莫雷，为研究“以太漂移”而设计的。后人研制出的各种具有实用价值的干涉仪多基于此种干涉仪的基本结构和设计思想。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 了解迈克尔孙干涉仪的结构与原理和调节方法；
2. 观察和了解等倾干涉现象；
3. 学会用迈克尔孙干涉仪测量 He-Ne 激光的波长。

## 二、实验原理(experimental principle)

迈克尔孙干涉仪的光路图如图 3-13-1 所示。S 为单色光源，L 为透镜，$G_1$，$G_2$ 为两块同材料等厚度的光学平板玻璃。在 $G_1$ 对着 E 面镀有一层半透明膜，照到它上面的光线，一半反射，一半透射，因而称为半反射透镜。当光线自 S 发出，经过透镜 L 到 $G_1$ 后被分为两束；一束光(①光)被反射至平面镜 $M_1$(可沿导轨移动)，另一束光(②光)透过 $G_1$ 经补偿板 $G_2$($G_2$ 与 $G_1$ 平行)射向平面镜 $M_2$(固定不动)；①光和②光分别被 $M_1$，$M_2$ 反射后在 E 处相遇；这两束光为相干光，它们在空间相遇时会产生干涉现象，在 E 处通过望远镜、观察屏等可以观察到干涉条纹。

补偿板 $G_2$ 的作用是使①光和②光均三次通过同样厚度的平面玻璃，从而避免①光和②光出现额外的光程差。$M_2'$是 $M_2$ 经过 $G_1$ 所成虚像，由 $M_2$ 发出的光，可以看作是由 $M_2'$发出来的；当 $M_1$ 与 $M_2$ 垂直，即 $M_2' \parallel M_1$ 时，所产生的干涉为等倾干涉；对于入射角为 $\theta$ 的光线，根据等倾干涉可知，由 $M_1$，$M_2'$反射后两束光的光程差 $\Delta$ 为

$$\Delta = 2nd\cos\theta \tag{3-13-1}$$

式中 $d$ 为空气膜厚度，空气的折射率 $n=1$；倾角相同的入射光线处于同一级干涉条纹，在 E 处观察到一组明暗相间的同心圆环，如图 3-13-2 所示，其第 $k$ 级明暗条纹满足的条件为

当 $\Delta=k\lambda(k=0,1,2,\cdots)$为明条纹；

当 $\Delta=(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}(k=0,1,2,\cdots)$为暗条纹。

由式(3-13-1)可知，当 $\theta=0$ 时，光程差 $\Delta$ 最大，表明等倾干涉中心条纹的干涉级次最高，越偏离中心条纹的干涉级次越低。当 $M_1$，$M_2'$间距离 $d$ 减小时，中心条纹的干涉级次 $k$ 要降低，条纹会沿半径向内移动，可以观察到环心“陷入”一个个圆环；反之，当 $M_1$，$M_2$ 间距离 $d$ 增大时，中心条纹的干涉级次 $k$ 要变高，条纹会沿半径向外移动，环心会“涌出”一个个圆环。由明条纹的干涉条件，当干涉条纹中心($\theta=0$)为明环时，有 $\Delta=2nd=k\lambda$，即

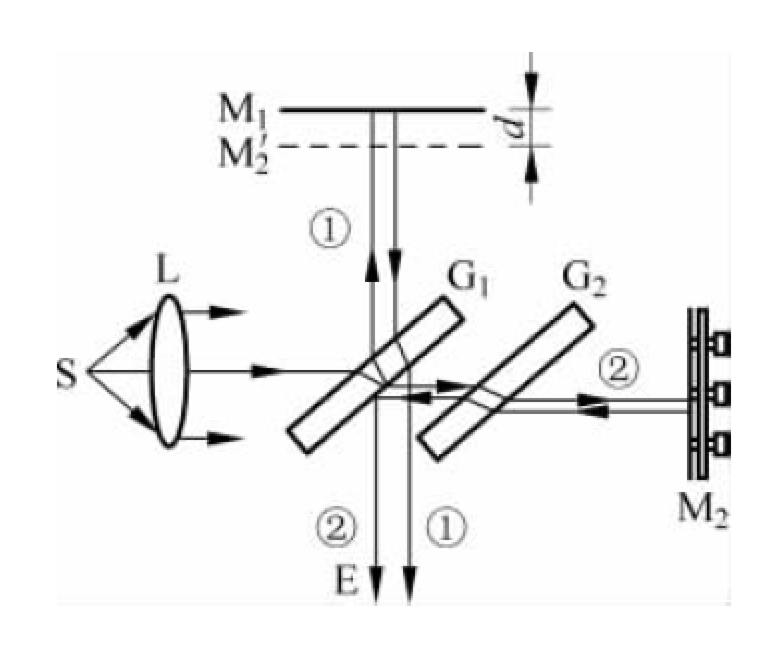



图 3-13-1　干涉光路图

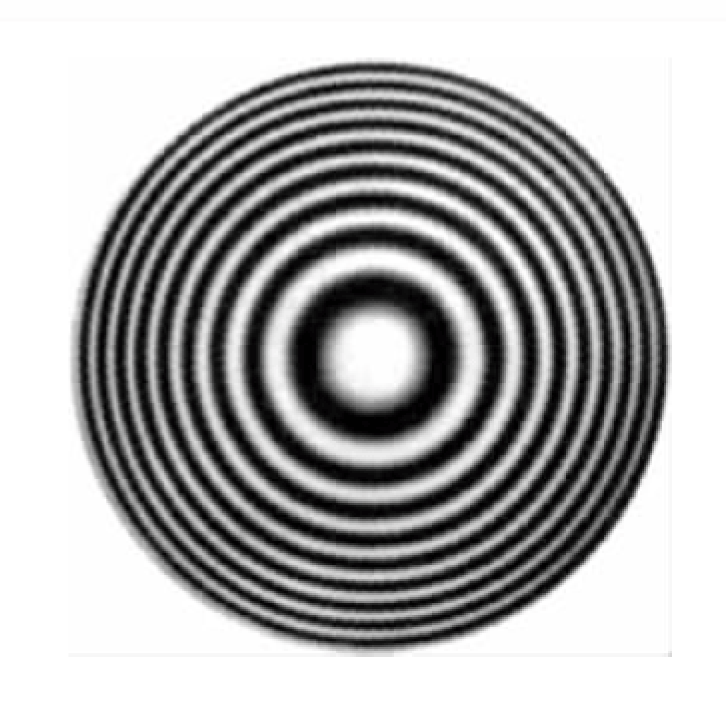


图 3-13-2　等倾干涉条纹

$$2\Delta d = \lambda \Delta k \tag{3-13-2}$$

当环心“陷入”或“涌出”一个圆环时，$\Delta k=1$，相应的有 $\Delta d=\lambda/2$。即 $M_1$，$M_2'$间距离 $d$ 每减小 $\lambda/2$，环心处就“陷入”一个圆环；反之，$M_1$，$M_2'$间距离 $d$ 每增加 $\lambda/2$，环心处就“涌出”一个圆环。

若 $M_1$ 移动了 $\Delta d$ 距离后，环心处“陷入”或“涌出”$N$ 个圆环，则有

$$\Delta d = N\frac{\lambda}{2} \tag{3-13-3}$$

实验中，只要测出平面镜 $M_1$ 移动的距离，并数出相应“陷入”或“涌出”圆环干涉条纹的个数，便可精确测量出光波的波长。

## 三、实验仪器(experimental device)

迈克尔孙干涉仪、He-Ne 激光器、钠光灯(或汞灯)、扩束镜等。

### 1. 迈克尔孙干涉仪的构造(见图 3-13-3)

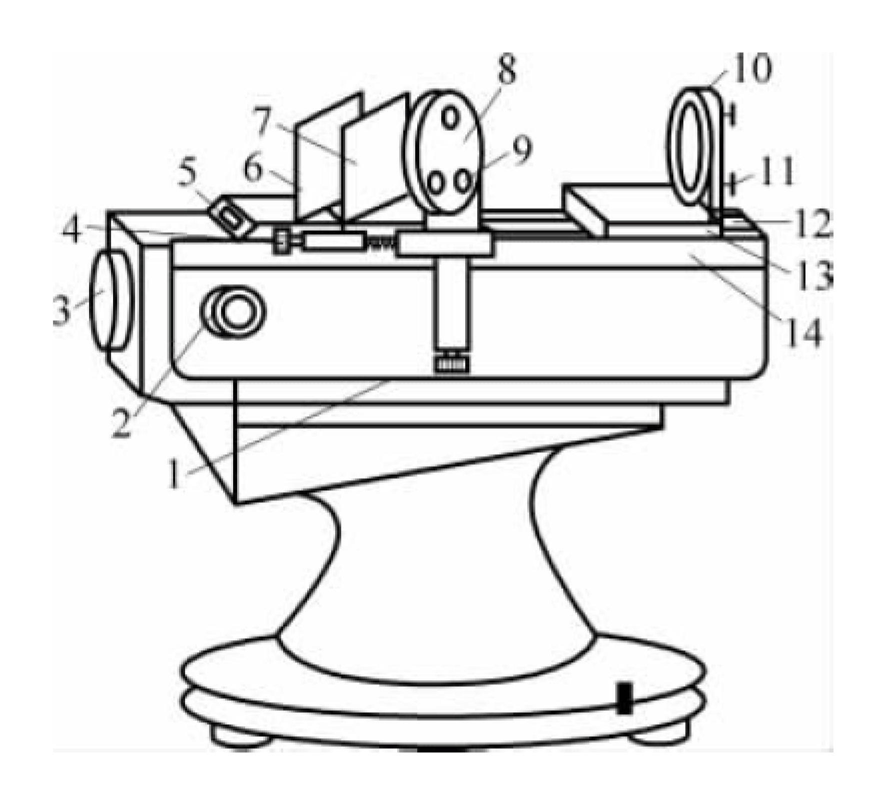



图 3-13-3　迈克尔孙干涉仪构造图

1—垂直拉簧螺钉；2—微动手轮；3—粗动手轮；4—水平拉簧螺钉；5—读数窗；6—分光板 $G_1$；7—补偿板 $G_2$；8—平面镜 $M_2$；9—$M_2$ 镜调节螺钉；10—平面镜 $M_1$；11—$M_1$ 镜调节螺钉；12—精密丝杠；13— 拖板；14—导轨

**2. 平面镜 $M_1$ 位置的读数**

移动平面镜 $M_1$ 时，确定 $M_1$ 位置的读数尺有三个：

1）主尺——为毫米刻度尺，位于导轨侧面，最度为 1mm，如图 3-13-4(a)所示，毫米以下的读数由测微尺读出；

2）测微尺 1——位于读数窗内，与粗动手轮转动圆盘相连，圆盘为 100 等分；粗动手轮转动盘每转动 1 小格，$M_1$ 移动 0.01mm；转动盘转动一圈，$M_1$ 移动 1mm，如图 3-13-4(b)所示；

3）测微尺 2——位于读数窗右侧的微动手轮上，微动手轮的圆周也为 100 等分；微动手轮转动 1 小格，$M_1$ 移动 0.0001 mm(即 0.1μm，为 1mm 的万分之一)；微动手轮转动一周，$M_1$ 移动 0.01mm；微动手轮正、反向旋转时，有一空程范围，因此测量时应只向一个方向转动，如图 3-13-4(c)所示。读数时主尺和测微尺 1 只读整数，不估读；而测微尺 2 必须估读一位数，即平面镜 $M_1$ 位置的读数为：

$$主尺读数+测微尺1读数+测微尺2读数\times 0.0001(\text{mm})$$

如图 3-13-4 中的读数为：$31\text{mm}+0.35\text{mm}+17.2\times 0.0001\text{mm}=31.35172\text{mm}$。

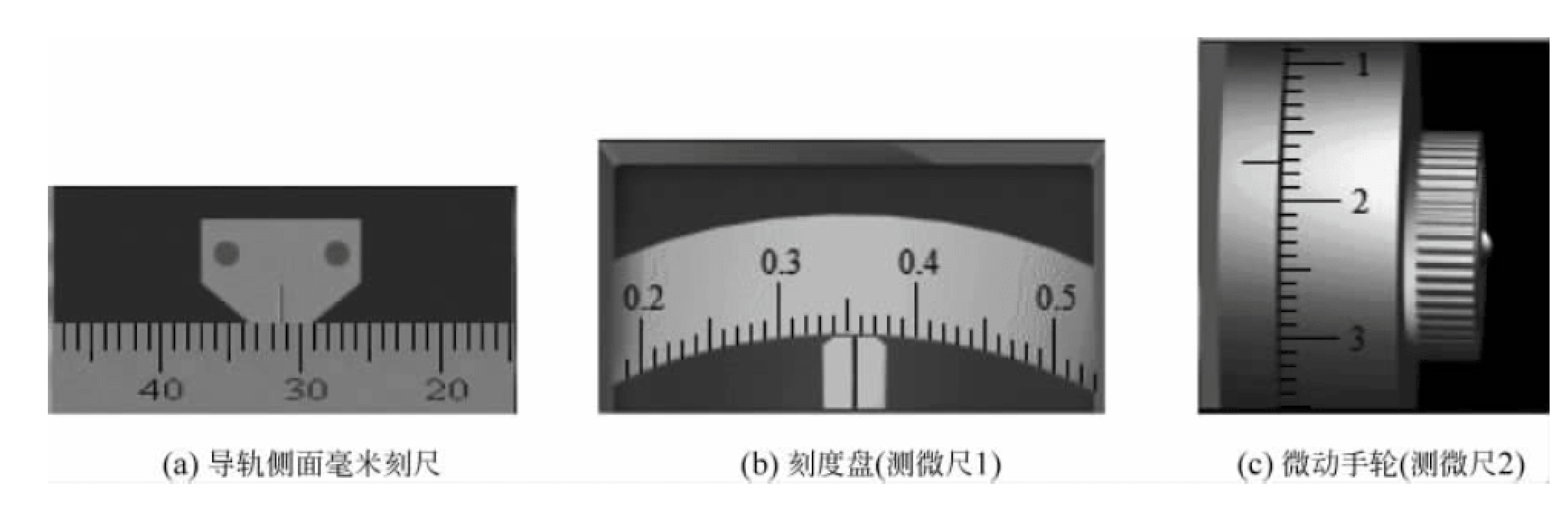



图 3-13-4　迈克尔孙干涉仪读数示意图

## 四、实验内容(experimental content)

**1. 调节迈克尔孙干涉仪**

1）熟悉迈克尔孙干涉仪的结构及各部分的作用。

2）转动粗动手轮，使平面镜 $M_1$ 位于主尺的 30～50mm 处，并使 $M_1$，$M_2$ 至分光板 $G_1$ 的距离接近相等。

3）调整光源与 $G_1$，$G_2$ 大致等高。开启光源，使激光束大致垂直于 $M_2$，可在光屏 E 处看到两组红色亮点像；调节 $M_2$ 后面的 3 个螺钉，使两组红色亮点像中最亮的两点重合，这时 $M_1$ 和 $M_2$ 相互垂直，即 $M_1$ 与 $M_2'$相互平行。

**2. 观察等倾干涉条纹**

在光源处放置旋转扩束镜，使光束照亮分光板 $G_1$ 的中央处。大致在 $M_1$，$G_1$ 的中心线位置，用眼睛在 E 处直接观察干涉现象；若没有出现干涉条纹，再仔细轻轻调节平面镜 $M_2$ 背后的三个调节螺钉(平面镜 $M_1$ 背后的螺钉已调好，切勿触动)，可以观察到干涉条纹；仔细调节水平和垂直拉簧螺钉，使干涉条纹呈圆环状，且圆环中心处于视场的中心；当上下左

右移动眼睛时，干涉条纹不移动(即无陷入或涌出现象)、不抖动，则 $M_1$，$M_2$ 严格垂直，此时所看到的就是清晰的等倾干涉条纹。

**3. 利用等倾干涉条纹测量光波波长**

1) 调整读数零点：将微动手轮沿某一方向转动至"0"刻线与基准线对齐；然后以相同方向转动粗动手轮使之对齐某一刻度，此时的读数即为干涉仪的零点读数；在此后的测量中，只能沿这一方向转动微动手轮，否则将引入空程差；如需反转时则必须按反方向重新调零。

2) 转动微动手轮，使 $M_1$ 在导轨上移动(即改变 $d$)，每"陷入"或"涌出"50 个圆环条纹时，记录 $M_1$ 的位置 $d_i$；连续观察 450 个圆环条纹，分别记录下 $M_1$ 的相应位置 $d_1$，$d_2$，…，$d_9$，$d_{10}$，填入表 3-13-1 中，并根据式 $\lambda_i=2\Delta d_i/N$(mm)计算波长，式中 $N=250$。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

**表 3-13-1 迈克尔孙测量数据**

| 条纹移动数 | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|
| $M_1$ 位置 $d_i$/mm | | | | | |
| 条纹移动数 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 |
| $M_1$ 位置 $d_{i+5}$/mm | | | | | |
| $\Delta d=\lvert d_{i+5}-d_i\rvert$/mm | | | | | |
| $\lambda_i=2\Delta d_i/(N/\text{mm})$ | | | | | |

### 2. 数据处理(data processing)

1) 计算波长的平均值 $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda}=\frac{\sum_{i=1}^{5}\lambda_i}{5}(\text{mm})$$

2) 计算不确定度 $u_\lambda$(只计算 A 类不确定度)

$$u_\lambda=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(\bar{\lambda}-\lambda_i)^2}{5\times(5-1)}}(\text{mm})$$

3) 测量结果

$$\lambda=\bar{\lambda}\pm u_\lambda(\text{mm})$$

## 六、注意事项(cautions)

1. 迈克尔孙干涉仪是精密光学仪器，平面镜 $M_1$，$M_2$，分光板 $G_1$ 和补偿板 $G_2$ 不准用手触摸；

2. 精密丝杠、导轨、手轮的精度很高，操作时应轻慢，不得频繁来回转动手轮；

3. 平面镜 $M_1$ 的背后 3 个螺钉以及水平和垂直拉簧螺钉，只能轻微转动，不得来回用力拧动；

4. 实验中，粗动与微动手轮只能沿同一个方向转动，以避免空程差；同理，在调整零点时，应先将微动手轮沿同方向转动几圈后，再使“0”刻线与基准线对齐。

## 七、思考题(exercises)

1. 迈克尔孙干涉仪补偿板、分光板的作用是什么？

2. 若 $M_1$，$M_2$ 不垂直(即 $M_1$，$M_2'$ 不平行，且有一小的夹角)，能否看到干涉条纹？这种干涉是何种干涉？

3. 用白光做光源，能否测量其中一光波的波长？

**关键词(key words)**

迈克尔孙干涉仪(Michelson interferometer)，等倾干涉(equal inclination interference)，波长(wavelength)，He-Ne 激光(He-Ne laser)，反射(reflection)，透射(transmission)

# 实验十四　空气中声速的测量

声波是在弹性介质中传播的机械波，声波在弹性介质中传播的速度，即声速，只与介质的性质有关，测定声速可以了解被测介质的性质、状态及其变化。频率在 20～20000Hz 之间的声波可引起听觉，称为可闻声波，简称声波；超声波的频率在 20000Hz 以上，不可闻。超声波具有波长短，易于定向发射等特点，所以在超声波段测定声速比较方便。通常利用压电式陶瓷换能器来进行超声波的发射和接收，本实验是用压电式陶瓷换能器来发射和接收超声波。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 学习测量空气中声速的两种方法：共振干涉（驻波）法和相位比较（李萨如图）法；
2. 加深对波动及驻波特性的理解；
3. 进一步掌握逐差法处理实验数据的方法。

## 二、实验原理（experimental principle）

超声波具有波长短、易于定向发射、不可闻等优点，所以本实验对超声波进行测量。超声波发生器主要由换能器构成，换能器可将高频电振荡转换成超声频的机械振动，从而产生超声波，将电能转变为声能，也可在超声频的声场中接收超声波将超声频的机械振动转换成高频电振荡，将声能转变为电能。

由波动理论可知，波速与波长、频率有如下关系：

$$v = \lambda f \tag{3-14-1}$$

测出波长 $\lambda$ 和频率 $f$ 后，即可计算出声速。式中 $f$ 由信号发生器读出，$\lambda$ 可用共振干涉法或相位比较法测出。

### 1. 相位比较法（phase comparison method）

设 $S_1$ 为发射器，$S_2$ 为接收器，在发射波和接收波之间产生的相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_{20} - \varphi_{10} = \frac{x}{\lambda} \cdot 2\pi \tag{3-14-2}$$

因此，可以通过测量 $\Delta\varphi$ 来求声速，$\Delta\varphi$ 的测量可以用示波器观察相互垂直振动合成的李萨如图形的方法。

设输入示波器 $X$ 轴的入射波的振动方程为

$$x = A_1\cos(\omega t + \varphi_{10})$$

输入示波器 $Y$ 轴由 $S_2$ 接收的波的振动方程为

$$y = A_2\cos(\omega t + \varphi_{20})$$

将上述两个公式中的 $t$ 消去可得合振动方程

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - 2\frac{xy\cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})}{A_1A_2} = \sin^2(\varphi_{20} - \varphi_{10}) \tag{3-14-3}$$

此方程的轨迹为椭圆，其长短和方位由相位差 $\Delta\varphi = \varphi_{20} - \varphi_{10}$ 决定。当相位差 $\Delta\varphi = \varphi_{20} - \varphi_{10}$

取 0～2π，按照 $\Delta\varphi$ 每增加 $\frac{\pi}{4}$ 画合振动的轨迹，如图 3-14-1 所示。当 $\Delta\varphi$ 变化 2π 时，会重复出现如图 3-14-1 所示图形，与这种图形重复变化相应的 $S_2$ 移动的距离为 λ，即为声波波长，代入式(3-14-1)就可以求出声速。

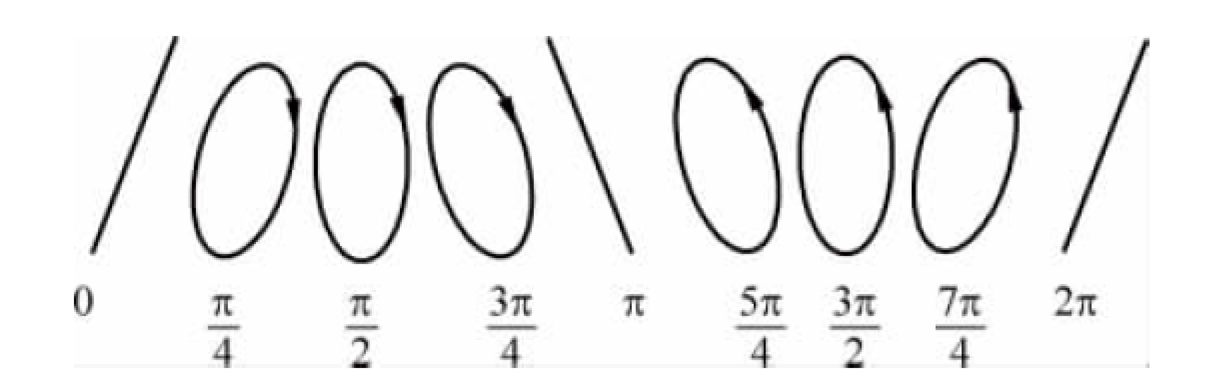



图 3-14-1　相互垂直频率相同的两个简谐运动的合成的轨迹

**2. 共振干涉法(驻波法)(the resonant interfering method (stationary wave method))**

由声源 $S_1$ 发出的平面简谐波沿 $X$ 轴正方向传播，接收器 $S_2$ 在接收声波的同时还反射一部分声波。因此，由 $S_1$ 发射出的声波和由 $S_2$ 反射的声波在 $S_1$，$S_2$ 之间形成干涉而出现驻波共振现象。

设沿 $X$ 轴正、负方向传播的入射波和反射波的波动方程分别为

$$y_1 = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right),\quad y_2 = A\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

在两波相遇处产生干涉，合成波的方程为

$$y = y_1 + y_2 = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) + A\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x\right) = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\cos\omega t \quad (3\text{-}14\text{-}4)$$

这就是驻波方程。

由驻波方程可知，对应于使 $\left|\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right| = 0$，即 $\frac{2\pi x}{\lambda} = (2k+1)\frac{\pi}{2}$，在 $x = (2k+1)\frac{\lambda}{4}$ $(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$ 位置上，声波的振动振幅为 0，称为波节。

根据上式可得相邻波节之间距离为

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = [(2k+1)+1]\frac{\lambda}{4} - (2k+1)\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2} \quad (3\text{-}14\text{-}5)$$

当 $\left|\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\right| = 1$，即 $\frac{2\pi x}{\lambda} = k\pi$ 时，在 $x = k\frac{\lambda}{2}$ $(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$ 位置上，声波的振动振幅最大为 $2A$，称为波腹。其余各点的振幅在零和最大值之间。

根据上式可得相邻波腹之间距离为

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = (k+1)\frac{\lambda}{2} - k\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \quad (3\text{-}14\text{-}6)$$

由式(3-14-5)、式(3-14-6)可以看出，相邻的两个波节或相邻的两个波腹之间的距离都是 $\frac{\lambda}{2}$，这样测出相邻波节或波腹之间的距离就可以求出两相干波的波长。

## 三、实验仪器(experimental device)

声速测定仪、信号发生器、示波器(使用方法详见实验八)

## 四、实验内容(experimental content)

### 1. 调整测试系统的谐振频率

当外加驱动信号的频率等于换能器的固有频率时会产生共振,在这一谐振频率上,换能器可以发射较强的超声波,声能和电能可有较好的相互转换。

1)按如图 3-14-2 所示,接好线路。$S_1$ 为超声波发射器,$S_2$ 为超声波接收器;将 $S_2$ 移近 $S_1$,使两者相距约 5cm。

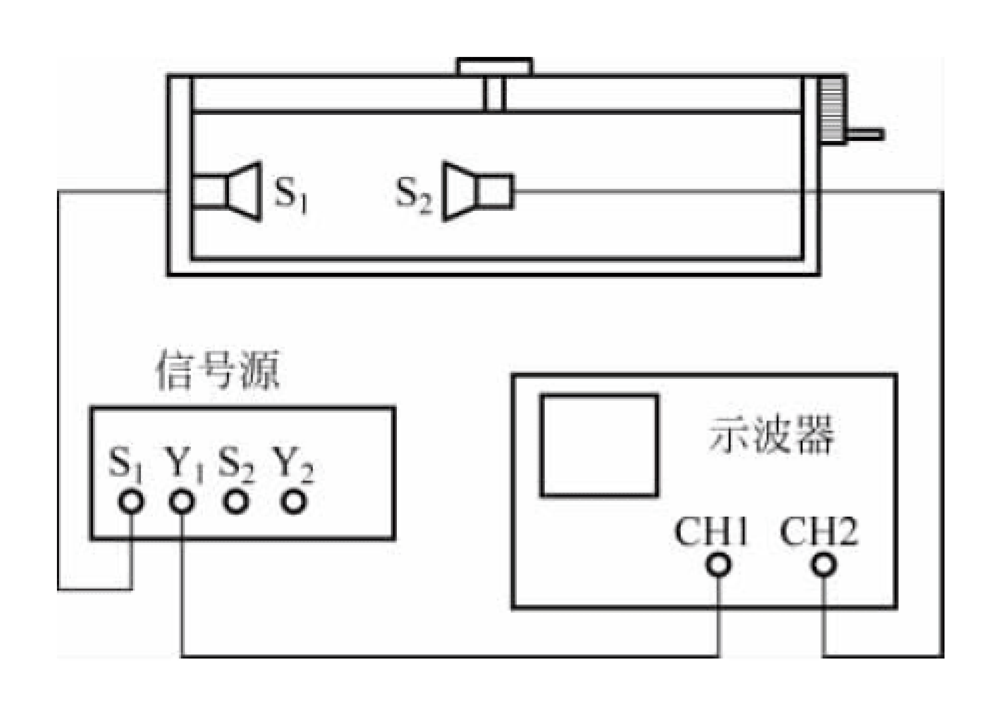



图 3-14-2 声速测量原理示意图

2)调节信号发生器的"发射强度"旋钮,使声速测试仪信号源输出合适的电压,然后调整信号源的频率(在 25～45kHz 之间,使用 5k～50k 挡),同时观察示波器,使示波器显示正弦波信号的电压(即振幅)最大。

3)缓慢移动 $S_2$,可以看到正弦波振幅的变化。当 $S_2$ 首次移动到第一次振幅极大处时,固定 $S_2$ 不动,仔细调节信号源的频率粗调与细调旋钮,使示波器显示的正弦波信号振幅最大,则此时信号源的输出频率等于换能器的谐振频率,在此频率上,换能器发射出较强的超声波。此后,不再调整信号发生器的频率。

### 2. 用共振干涉法(驻波法)测量声速

测试方法设置到连续波方式,选好谐振频率。转动距离调节手轮,移动 $S_2$,波形的幅度会随之发生变化,记录下幅度为最大时的距离 $x_1$(数值可由数显尺读出);再继续向一个方向移动手轮,当波形经变小后再到最大时,记录下此时的距离 $x_2, x_3, \cdots, x_9, x_{10}$;则声波波长为:$\lambda = |x_{i+5} - x_i|$(mm)。测量 10 次,填入表 3-14-1 中。

### 3. 相位比较(李萨如图)法测量声速

测试方法设置到连续波方式,选择合适的发射强度,完成测试系统的谐振频率,示波器打到"$X$-$Y$"方式(时间扫描因数选择开关 TIME/DIV 逆时针旋到底),在荧光屏上显示李萨如图形,如图 3-14-3 所示。转动手轮,移动 $S_2$,当示波器显示屏上出现一条 45°的斜线形李萨如图形时(如 $\Delta\varphi=0$),由数显尺记录下此时的距离 $x_1$。依次继续缓慢移动 $S_2$,每次得到相同的 45°的斜线形李萨如图形时(如 $\Delta\varphi=2\pi$),接收波的相位恰好变化 $2\pi$ 的整数倍,记录下此时的距离 $x_2, x_3, \cdots, x_9, x_{10}$;测定 10 次,填入表 3-14-2 中。

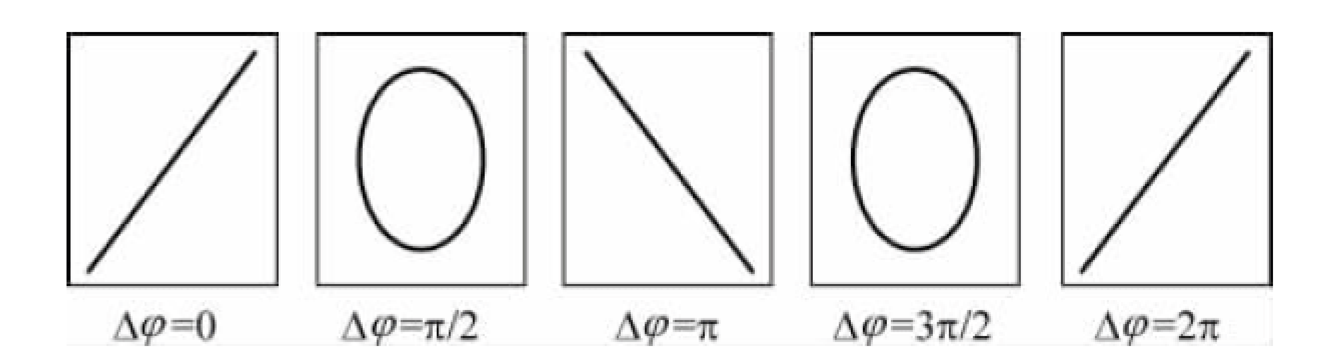



图 3-14-3　同频率相互垂直的正弦波合成的李萨如图形

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

1) 驻波法测波长

室温 $t=$________℃,频率 $f=$________ kHz。

**表 3-14-1　驻波法测波长数据**

| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $x_i$/mm | | | | | |
| 次数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $x_{i+5}$/mm | | | | | |
| $x_{i+5}-x_i$/mm | | | | | |

2) 相位比较法测波长

频率 $f=$________ kHz。

**表 3-14-2　相位比较法测波长数据**

| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $x_i$/mm | | | | | |
| 次数 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $x_{i+5}$/mm | | | | | |
| $x_{i+5}-x_i$/mm | | | | | |

### 2. 数据处理(data processing)

1) 共振干涉法测声速

(1) 根据表 3-14-1 的数据,用逐差法计算平均值$\bar{x}$,

$$\bar{x}=\frac{1}{5\times 5}[(x_{10}-x_5)+\cdots+(x_6-x_1)]$$

(2) 超声波波长为

$$\bar{\lambda}=2\bar{x}$$

(3) 超声波声速为

$$\bar{v}=\bar{\lambda}\bar{f}$$

(4) 与声速理论值 $v_{理}$ 进行比较,并计算相对误差

$$E=\frac{|\bar{v}-v_{理}|}{v_{理}}\times 100\%$$

其中，声速理论值为 $v_{理}=v_0\sqrt{1+\frac{t}{273.15}}$ (m · s$^{-1}$)，式中 $v_0=331.45$ m · s$^{-1}$。

2）相位比较法测声速

（1）根据表 3-14-2 的数据，用逐差法计算平均值 $\bar{x}$，

$$\bar{x}=\frac{1}{5\times5}[(x_{10}-x_5)+\cdots+(x_6-x_1)]$$

（2）超声波波长为

$$\bar{\lambda}=\bar{x}$$

（3）超声波声速为

$$\bar{v}=\bar{\lambda}\,\bar{f}$$

（4）计算超声波声速的不确定度 $u_v$

波长的不确定度为

$$u_\lambda=\sqrt{u_A^2+u_B^2}$$

其中，A 类不确定度为

$$u_A=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}\left(\frac{1}{5}\mid x_{i+5}-x_i\mid-\bar{\lambda}\right)^2}{5\times(5-1)}}$$

B 类不确定度为

$$u_B=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}},\quad 其中\ \Delta_{仪}=0.01\text{mm}$$

而声速的相对不确定度为

$$E_r=\sqrt{\frac{u_\lambda^2}{\bar{\lambda}^2}+\frac{u_f^2}{\bar{f}^2}}$$

式中 $u_f=\frac{\Delta f}{\sqrt{3}}$（$\Delta f$ 为信号发生器的误差，取 $\Delta f=0.01$kHz）。超声波声速的不确定度为

$$u_v=\bar{v}E_r$$

测量结果表示为

$$v=\bar{v}\pm u_v(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

## 六、注意事项（cautions）

1. 用共振干涉法（驻波法）测量声速时，应仔细调节测试系统的谐振频率，使系统达到最佳驻波共振状态；

2. 实验中应避免空程差，手轮只能向同一个方向移动，读数时不能退读；

3. 声波在传播过程中有能量损失，因此随着接收器 $S_2$ 远离发射器 $S_1$，波的振幅逐渐衰减，但波腹和波节的位置不会改变，并不影响对波长的测量；只要注意移动接收器 $S_2$ 时，一定严格移至各个幅度为相对最大处。

## 七、思考题(exercises)

1. 为何要在共振状态下测量声速?
2. 共振干涉法和相位法测声速有何不同?

**关键词(key words)**

超声波(ultrasonic),共振干涉法(resonance interference method),相位比较法(phase comparison method),李萨如图(Lissajou figure),示波器(oscilloscope),信号发射器(signal transmitter),声速(sonic velocity)

# 实验十五　液体黏滞系数的测量

黏滞系数又称内摩擦系数，是液体的重要性质之一，在工程技术、生产技术和医学等方面，具有重要的应用意义。如在液压传动、机械润滑、石油输送的能量损耗、医学上测定血液的黏滞力来作医学判断等方面，都与液体的黏滞系数有关。因此，掌握液体的黏滞系数的测量方法是十分必要的。实验中，对于黏度较小的液体(如水、四氯化碳等)，常用毛细管法；对于黏度较大的液体(如蓖麻油、甘油等)，常用落球法。本实验是用落球法测量蓖麻油的黏滞系数。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 学习使用光电计时器的方法；
2. 测量蓖麻油的黏滞系数。

## 二、实验原理(experimental principle)

当液体流动时，平行于流动方向的各层流体的速度都不相同，互相接触的两层液体之间存在着相对滑动，在各层之间就有摩擦力产生，这一摩擦力称为液体的内摩擦力或黏滞力。它的方向平行于摩擦面，其大小与速度梯度$\frac{dv}{dx}$和接触面积$S$成正比，即

$$f = \eta S \frac{dv}{dx} \tag{3-15-1}$$

式中$\eta$称为黏滞系数，它取决于液体的性质和温度。一般情况下，黏滞系数随温度的升高而减小。其物理意义是：速度梯度为单位量时，作用于流体单位面积上的内摩擦力的大小。它的单位在国际单位制中是：千克/(米・秒)，即“帕・秒”，用“Pa・s”表示。

当一个直径为$d$的光滑小球，以速度$v$在无限深广的均匀液体中运动时，若小球的运动速度不大且在运动中不产生旋涡的情况下，根据斯托克斯定律，小球受到的黏滞力为

$$f = 3\pi\eta dv \tag{3-15-2}$$

如图3-15-1所示，小球在无限深广的液体中下落时，受到三个力的作用，即向下的重力($mg=\rho gV$)，向上的浮力($F=\rho_0 gV$)和黏滞阻力($f$)，$\rho$和$\rho_0$分别是小球和液体的密度，$V$是小球的体积，$g$是重力加速度。

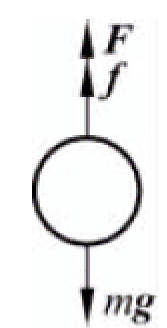



图 3-15-1　小球受力分析图

小球开始下落时，由于小球的下落速度很小，黏滞阻力也比较小，小球受到的重力大于它受到的浮力和黏滞阻力之和，小球向下作加速运动。随着小球下落的速度增大，黏滞阻力也随之增大，当速度达到一定数值时，三个力达到平衡，此后小球就以该速度匀速下落，根据力的平衡方程有：

$$f+\rho_0 gV=\rho gV \tag{3-15-3}$$

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\rho_0 g+3\pi\eta dv=\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\rho g \tag{3-15-4}$$

可得

$$\eta=\frac{(\rho-\rho_0)gd^2}{18v} \tag{3-15-5}$$

在本实验中,小球在玻璃管中下落,液体在各个方向无限宽广的条件不满足,式(3-15-5)要进行修正。如果小球在直径为 $D$,液柱高度为 $H$ 的圆柱形筒内下落,考虑管壁对小球的影响,则式(3-15-5)可修正后为

$$\eta=\frac{(\rho-\rho_0)gd^2}{18v}\cdot\frac{1}{\left(1+2.4\dfrac{d}{D}\right)\left(1+1.6\dfrac{d}{H}\right)} \tag{3-15-6}$$

## 三、实验仪器(experimental device)

THQNZ-1 型液体黏滞系数测试箱、THQNZ-1 型液体黏滞系数测试台、镊子、蓖麻油、米尺、小钢球、磁铁、温度计。

### 1. 仪器结构和测试仪面板图(如图 3-15-2,图 3-15-3 所示)

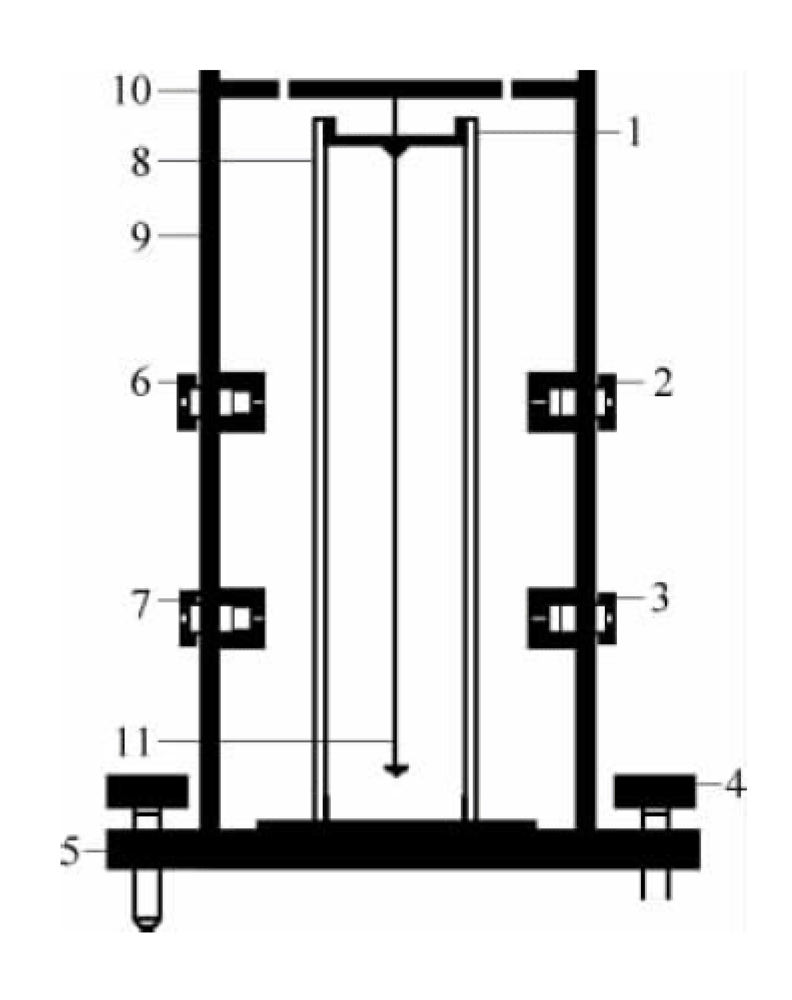



图 3-15-2　仪器结构示意图

1—抛球漏斗;2,3—激光管;4—底座调平螺钉;5—底座;6,7—激光接收管;8—有机玻璃量筒;9—支撑架;10—顶盖;11—水平吊锤

### 2. 光电计时器的使用方法

1) 将光电计时器和测试台连接起来,并接通电源。

2) 调节底座上的三个调平螺钉,使铅锤的尖端正好对准底盘上的小孔。

3) 观察激光管是否正常发光,发出的激光是否正好入射到激光接收器上。

4) 用一根细绳切断激光管和激光接收器的光路,观察计时器是否有响应。

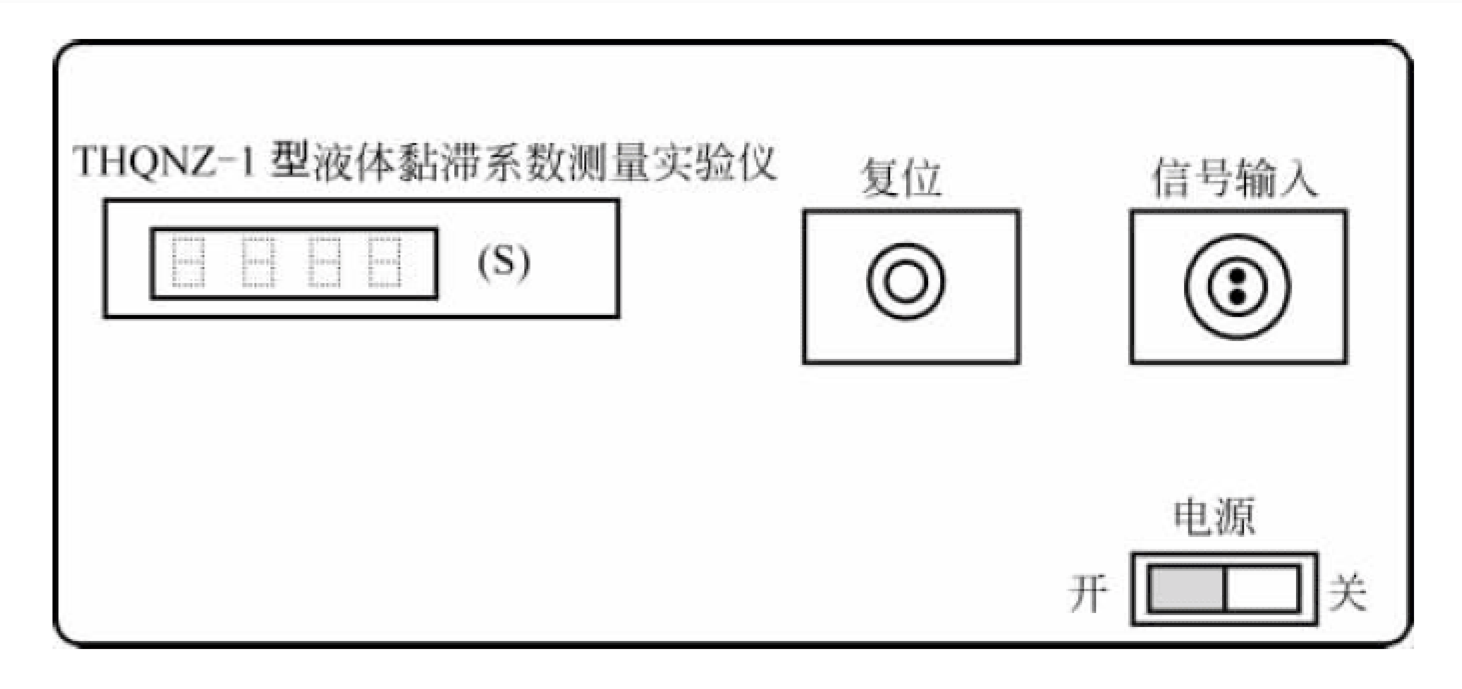



图 3-15-3 测试仪面板图

5）按"复位"键，然后将小球放入漏斗中，并使小球沿有机玻璃筒的轴线下落。观察当小球切断光电门Ⅰ的光路时，计时器是否开始计时，小球切断光电门Ⅱ的光路时，观察计时器是否停止计时；当小球再次切断光电门Ⅰ的光路时，观察是否计时器清零并开始计时，当小球再次切断光电门Ⅱ的光路时，观察计时器是否停止计时。

## 四、实验内容(experimental content)

1. 将粘滞系数测试箱和测试仪用屏蔽线连接好，调整测试台的底盘水平，使铅锤的锥尖对准底盘中心处。

2. 接通测试箱的电源，观测激光管是否发光正常，仔细调节两个激光接收器的位置，使得激光管发出的光正好入射到激光接收器的小孔中。

3. 将导引小球下落的盖子取下，并将蓖麻油注入圆柱形的有机玻璃筒中，将导引小球下落的盖子放回到测试架上。

4. 练习使用光电计时器，先按"复位"按钮，然后用镊子夹起小球，为了使其表面完全被所测的油浸润，先将小球在油中浸一下，然后放入导引小球下落盖子的小孔中，小球将从有机玻璃筒的轴线下落，观测小球在下落过程中是否能遮挡两个激光管发出的光，第一次遮挡光电门Ⅰ开始计时，第二次遮挡光电门Ⅱ计时结束，观测计时器是否正常工作。

5. 实验测量开始前，用温度计测量一次油温，在实验结束后再测一次油温，取两次油温的平均值作为实验油温。

6. 将光电门Ⅱ(测试台下面的光电门)固定在支撑架的底端，从下往上依次移动光电门Ⅰ(测试台上面的光电门)的位置，用米尺测量两个光电门的距离 $L$，测量不同下落距离 $L$ 和小球下落所用的时间 $t$，每个位置测量 10 次，并记录在表 3-15-1 中。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

小球的直径：$d=2\text{mm}$，小球密度：$\rho=7.85\times10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$，有机玻璃筒的内径：$D=50\text{mm}$，液体的高度：$H$(用米尺根据实际情况测量)，蓖麻油的密度：$\rho=0.962\times10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$，液体的高度 $H=$________，测量前油温 $T_1=$________；测量后油温 $T_2=$________。

表 3-15-1　液体黏滞系数测量数据

| $L$ | | $t$ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $t_5$ | $t_6$ | $t_7$ | $t_8$ | $t_9$ | $t_{10}$ | $\overline{t}$ |
| $L_1$ | | | | | | | | | | | | |
| $L_2$ | | | | | | | | | | | | |
| $L_3$ | | | | | | | | | | | | |
| $L_4$ | | | | | | | | | | | | |
| $L_5$ | | | | | | | | | | | | |

**2. 数据处理(data processing)**

(1) 验证小球在测量下落过程中是否处于匀速运动状态。

根据表 3-15-1 中的实验数据，计算出在每一段距离小球下落的平均速度，即 $v_1$，$v_2$，$v_3$，$v_4$，$v_5$；如果下落的各平均速度相等，证明小球在下落过程中处于匀速运动状态。

(2) 计算出小球的平均速度，即 $\overline{v}=\dfrac{v_1+v_2+v_3+v_4+v_5}{5}$，并代入式(3-15-5)计算出 $\eta$ 的值，用式(3-15-6)进行修正，求出 $\eta'$。

(3) 分析误差原因。

## 六、注意事项(cautions)

1. 仪器使用前，要先调节底座上的调平螺丝将底座调节到水平。在测量实验数据前要先学习光电计时器的使用方法、技巧及注意事项。

2. 观察激光管是否正常发光，并将激光正好入射到激光接收管中。

3. 在仪器第一次使用时，要将蓖麻油倒入有机玻璃筒中，在这个过程中会使蓖麻油中产生大量气泡，这些气泡会影响测量结果，因此测量时需要等气泡消失后再进行。

## 七、思考题(exercises)

1. 如何判断小球在下落过程中是否处于匀速运动状态？

2. 如果液体的黏滞系数较小，而且小球的直径又较大，实验结果该做何处理？

3. 用激光光电门测量小球下落时间的方法有什么优缺点？

**关键词(key words)**

液体(liquid)，速度(velocity)，摩擦系数(friction coefficient)，密度(density)，质量(mass)

# 实验十六　不良导体导热系数的测定

导热系数是反映材料的导热性能的重要物理量，它是热交换的三种（导热、对流和辐射）基本形式之一，在工程热物理、材料科学、固体物理及能源等领域有重要的应用意义。如熔炼炉、传热管道、散热器、加热器，以及日常生活中水瓶、冰箱等都要考虑它们的导热程度大小。所以，对导热系数的研究和测量有重要的意义。导热系数与材料的结构和杂质含量有关，而且与温度的变化有关，因此材料的导热系数通常需要由实验测得。导热系数的测量方法有稳态法和动态法。稳态法在待测样品内部最终形成稳定的温度分布，而动态法最终在样品内部形成的温度分布是随时间变化的。本实验是利用稳态法测定不良导体的导热系数的实验方法。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 掌握稳态法测定不良导体的导热系数的方法。
2. 了解物体散热速率和传热速率的关系。

## 二、实验原理（experimental principle）

### 1. 傅里叶热传导定律（Fourier's law of thermal conduction）

当物体内部有温度梯度存在时，就有热量从高温处传递到低温处，这种现象叫热传导现象。早在 1882 年著名法国数学、物理学家傅里叶（Fourier）就提出了热传导的定律：若在垂直于热传导方向 $x$ 上作一截面 $\mathrm{d}S$，以 $\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$ 表示与面积 $\mathrm{d}S$ 相垂直方向上的温度梯度，那么在时间 $\Delta t$ 内通过截面积 $\mathrm{d}S$ 所传递的热量 $\mathrm{d}Q$ 为

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}=-\lambda\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\mathrm{d}S \tag{3-16-1}$$

式中 $\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$ 为传热速率，即单位时间内通过截面积 $\mathrm{d}S$ 的热量；负号代表热量传递方向是从高温处传至低温处，即传热方向与温度梯度方向相反。比例系数 $\lambda$ 称为导热系数，其物理意义：在温度梯度为一个单位时，在单位时间内通过单位面积所传递的热量，单位是瓦・米$^{-1}$・开$^{-1}$（$\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$）。

### 2. 稳态法测传热速率（measurement of thermal conduction rate by steady-state method）

如图 3-16-1 所示为测定样品导热系数的实验装置。图中待测样品（圆盘）半径为 $R_1$，厚度为 $h_1$，上下的表面积为 $S$，样品上表面与加热盘（上面的黄铜盘）的下表面接触，温度为 $T_1$，加热盘由内部电热丝加热，将热量通过样品上表面传入样品，样品下表面与散热盘（下面的黄铜盘）的上表面相接，温度为 $T_2$，即样品中的热量通过下表面向散热盘散发。当样品上下表面维持稳定的温度，侧面近似绝热，则式（3-16-1）改写为

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}=-\lambda\frac{T_1-T_2}{h_1}S \tag{3-16-2}$$

式中 $S$ 为样品横截面积。

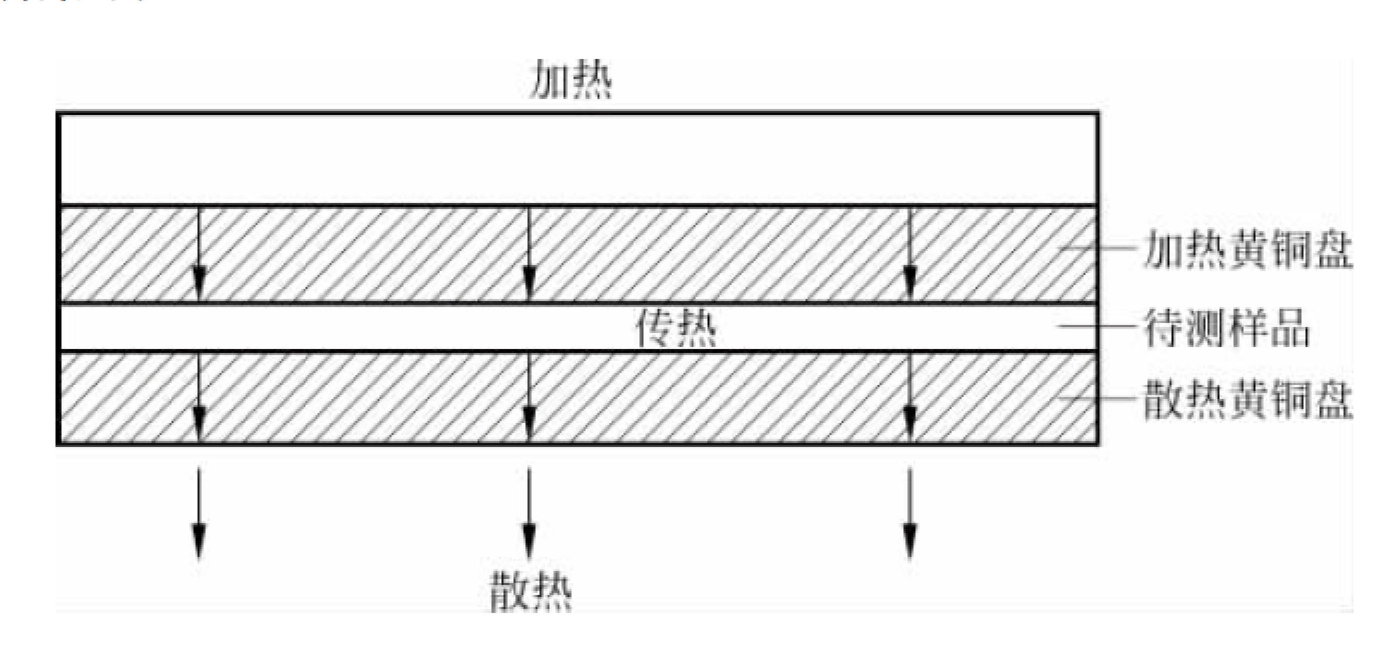



图 3-16-1　导热系数实验装置示意图

当传热达到稳定状态时，上、下表面的温度 $T_1$，$T_2$ 不变，此时可以认为通过待测样品的传热率与黄铜盘向周围环境的散热率相等，即

$$\left.\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}\right|_{T_1=T_{10}}=\left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}\tag{3-16-3}$$

式中，$T_1$，$T_2$ 分别是传热稳定时的样品上下表面温度，$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$是样品的传热速率，$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$是黄铜盘散热率。那么式(3-16-2)可表示为

$$\left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}=-\lambda\frac{T_1-T_2}{h_1}S\tag{3-16-4}$$

由此可见关键是求黄铜盘散热率$\left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}$。实验中，当测出稳态时样品上下表面的温度 $T_{10}$ 和 $T_{20}$ 之后，即可移去样品，让加热盘下表面与散热盘上表面直接接触，继续加热下面的黄铜盘，使其温度比稳定时的 $T_{20}$ 高 10℃左右，再将上面的加热盘移去，让下面的黄铜盘自然冷却(勿打开风扇)。观察其温度随时间的变化情况，然后由此求出下面的黄铜盘在 $T_2=T_{20}$ 附近冷却速率为

$$\left.\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}$$

那么黄铜盘的散热率与其冷却速率的关系为

$$\left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}=mc\left.\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}\tag{3-16-5}$$

式中，$m$ 是黄铜质量，$c$ 是黄铜比热容($3.77\times10^2\,\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$)。

在实验中，样品传热过程中，只考虑下面的黄铜盘的下表面和侧面散热，其散热外表面积为 $\pi R_2^2+2\pi R_2h_2$。但在测冷却速率$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$时，黄铜盘上表面也暴露在外，实际是黄铜盘的上、下表面和侧面都在散热，其总散热外表面积为 $2\pi R_2^2+2\pi R_2h_2$。考虑到物体冷却速率与它的表面积成正比关系，式(3-16-5)修正为

$$\begin{aligned}\left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}&=mc\left.\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}\left(\frac{\pi R_2^2+2\pi R_2h_2}{2\pi R_2^2+2\pi R_2h_2}\right)\\&=mc\left.\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}}\cdot\frac{R_2+2h_2}{2R_2+2h_2}\end{aligned}\tag{3-16-6}$$

式中 $R_2$,$h_2$ 分别为散热黄铜盘半径和厚度。

将式(3-16-6)代入式(3-16-4)并整理得待测样品导热系数为

$$\lambda = mc \left.\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}\right|_{T_2=T_{20}} \cdot \frac{R_2+2h_2}{2R_2+2h_2} \cdot \frac{h_1}{T_{10}-T_{20}} \cdot \frac{1}{\pi R_1^2} \tag{3-16-7}$$

## 三、实验仪器(experimental device)

THQDC-1 型导热系数测定仪、游标卡尺、天平、镊子。

THQDC-1 型导热系数测定仪使用说明如下:

### 1. 实验仪的供电

实验仪的后面板设有带保险丝管(2A)的 220V 单相交流电源三芯插座,另配有三芯插头电源线一根。箱内设有一只降压变压器,为电路板提供多组低压交流电源。

### 2. PID 智能温度调节器

1) 面板说明及操作说明(见图 3-16-2)

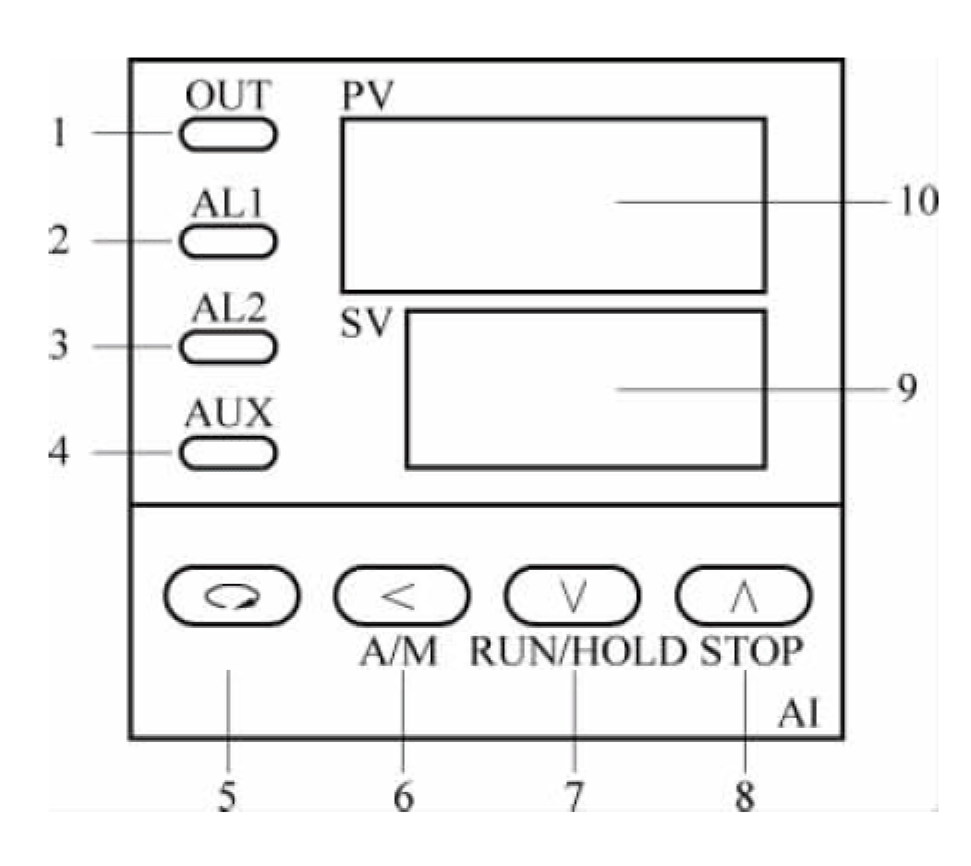



图 3-16-2 面板说明及操作说明

1—调节输出指示灯;2—报警 1 指示灯;3—报警 2 指示灯;4—AUX 辅助接口工作指示灯;5—显示转换(兼参数设置进入);6—数据移位(兼手动/自动切换及程序设置进入);7—数据减少键(兼程序运行/暂停操作);8—数据增加键(兼程序停止操作);9—给定值显示窗;10—测量值显示窗

2) 显示状态

如图 3-16-3 所示,仪表上电后,将进入显示状态①,此时仪表上显示窗口显示测量值(PV),下显示窗口显示给定值(SV)。按(⟲)键可切换到显示状态②,此时下显示窗口显示输出值。状态①②同为仪表的基本状态,在基本状态下,SV 窗口能用交替显示的字符来表示某些状态,如输入的测量信号超出量程(因传感器规格设置错误、输入断线或短路均可能引起)时,则闪动显示“orAL”。此时仪表将自动停止控制,并将输出固定在参数 oPL 定义的值上。

OUT 输出指示灯:输出指示在线性电流输出时通过亮/暗变化反映输出电流的大小。

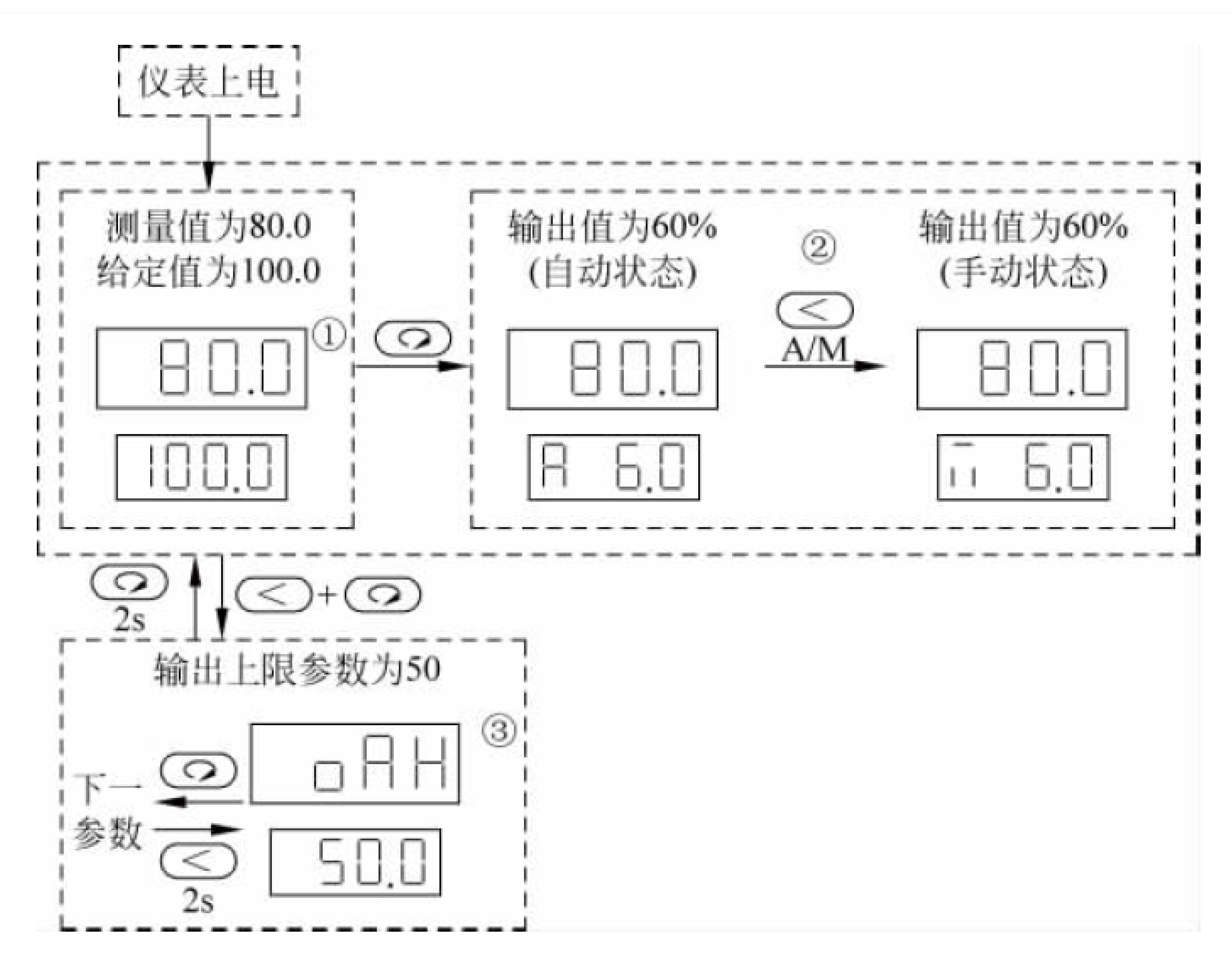



图 3-16-3 显示状态

3）基本使用操作

（1）显示切换：按 < 键可以切换不同的显示状态①②。

（2）修改数据：仪表下显示窗口显示的数值除自动输出值不可直接修改外，其余数据均可通过对应键来修改下显示窗口显示的数值。例如，需要设定给定值时，可将仪表切换到显示状态①，即可通过按 < 、 ∨ 或 ∧ 键来修改下显示窗口显示的数值。人工智能(AI)仪表同时具备数据快速增减法和小数点移位法。按 ∨ 键减小数据，按 ∧ 键增加数据，可修改数值位的小数点同时闪动（如同光标）。按对应键并保持不放，可以快速地增加或减小数值，并且速度会随右移加快(3 级速度)。而按 < 键则可直接移动修改数据的位置（光标），操作快捷。

（3）手动/自动切换：在显示状态②下，按键 A/M（即 < 键），可以使仪表在自动及手动两种状态下进行无扰动切换。在显示状态②且仪表处于手动状态下，直接按 ∧ 键或 ∨ 键可增加及减少手动输出值。通过对 run 参数进行设置（详见后文），也可使仪表不允许由面板按键操作来切换至手动状态，以防止误入手动状态。

（4）设置参数：在基本状态（显示状态①或②）下按 < 键并保持约 2s，即进入参数设置状态（显示状态③）。在参数设置状态下按 < 键，仪表将依次显示各参数，例如控制方式 Ctrl，速率参数 $P$，输入规格 $Sn$，小数点位置 Dip，输出方式 oP1，输出下限 oPL，输出上限 oPH，运行状态 run 等。用 ∨ 、 ∧ 、 < 等键可修改参数值，按 < 键并保持不放，可返回显示上一参数。如果没有按键操作，约 30s 后会自动退出设置参数状态。

4）手动自整定

由于自整定执行时采用位式调节，其输出将定位在由参数 oPL 及 oPH 定义的位置。如果环境温度不稳定，在 $P$，$I$，$D$ 参数设置很恰当的情况下控温效果不好，可以采用手动自整定模式。当被控温度响应快速时，手动自整定方式能获得更准确的控稳效果。实验时可在显示状态②手动状态下根据温度变化设定输出值，控制温度在设定值±1℃范围内。

5）功能及设置（参数功能说明）

（1）控制方式 Ctrl

本测定仪采用 AI 调节/PID 调节，允许从面板启动执行自整定功能。设置参数 Ctrl=1。

（2）速率参数 $P$

$P$ 与每秒内仪表输出变化 100%时测量值对应变化的大小成反比，当 Ctrl=1 时，其数值定义如下：

$$P=1000\div\text{每秒测量值升高值（测量单位是 0.1℃或 1 个定义单位）}$$

如仪表以 100%功率加热并假定没有散热时，电炉每秒升 1℃，则

$$P=10001\div10=100$$

$P$ 值类似 PID 调节的比例带，但变化相反。$P$ 值越大，比例、微分作用成比例增强；$P$ 值越小，比例、微分作用相应减弱。$P$ 参数与积分作用无关。设置速率参数 $P=33.0$。

（3）积分时间参数 $I$、微分时间参数 $d$

设置积分时间参数 $I=30$，微分时间参数 $d=0.1$。

（4）输出周期 Ctl

Ctl 参数值在 0.5～125s（0 表示 0.5s）之间设置，它反映仪表运算调节的快慢。Ctl 值越大，比例作用增强，微分作用减弱；Ctl 值越小，则比例作用减弱，微分作用增强。Ctl 值大于或等于 5s 时，则微分作用被完全消除，系统成为比例或比例积分调节。

（5）输入规格 $Sn$

$Sn$ 用于选择输入规格，本测定仪采用 Pt100 测温控温，输入规格为 Pt100，设置参数 $Sn=21$。

（6）小数点位置 dIP

本测定仪设置参数 dIP=1，显示格式为 000.0，小数点在十位，温度显示分辨率为 0.1℃。

（7）输出方式 oP1

本测定仪采用 4～20mA 线性电流输出，设置 oP1=4。

（8）输出下限 oPL

限制调节输出最小值。输出范围为 0～110。设置 oPL=0～5。

输出下限 oPL 应根据环境温度设置，环境温度越低，oPL 设置越高；反之，环境温度越高，oPL 设置越低。

（9）输出上限 oPH

限制调节输出最大值。输出范围为 0～110，且 oPH>oPL。设置 oPH=50。

（10）运行状态 run

run 参数定义自动/手动工作状态，本测定仪设置 run=1，用于自动调节状态，也可手动操作。

**3. 加热散热及测温装置**

1）待测样品

（1）材料：有机玻璃、橡胶、胶木

（2）尺寸：半径 $R_1$＝60mm＝0.06m，厚度 $h_1$＝5mm＝0.005m。

2）加热盘、散热盘

（1）材料：黄铜盘

（2）散热盘尺寸：半径 $R_2$＝60mm＝0.06mm，厚度 $h_2$＝12mm＝0.012m。

（3）散热盘质量 $m$＝1.098kg（参考值）。

3）加热丝

功率：300W。

4）测温传感器：热电阻 Pt100。

5）温度表

（1）测温范围：0～200℃。

（2）最小分辨率：0.1℃。

（3）测温精度：±0.3℃。

**4. 控温装置**

（1）PID 智能温度控制加 AI 调节，可控硅调节输出。

（2）控温精度：±1℃。

**5. 计时器**

（1）计时范围：0～999s。

（2）最小分辨率 1s。

（3）计时精度 $10^{-5}$s。

**6. 冷却装置**

风扇（DC24V，2.4W）。

## 四、实验内容（experimental content）

1. 用游标卡尺测量待测样品盘的半径 $R_1$ 和厚度 $h_1$，散热黄铜盘的半径 $R_2$ 和厚度 $h_2$，用天平测量散热黄铜盘的质量 $m$，填入表 3-16-1 中。参考值为 $R_1$＝$R_2$＝60mm＝0.06m，$h_1$＝5mm＝0.005m，$h_2$＝12mm＝0.012m，$m$＝1.136kg。

2. 安装实验装置（此过程应在关闭测定仪电源的情况下进行）。

按图 3-16-1 所示，将散热黄铜盘小心安装在测定仪固定支架上，将测温孔朝外。然后将待测样品盘、加热黄铜盘依次放在上面，将加热电源插孔朝内，测温孔朝外，且三盘上下对齐。最后将加热盘 Pt100 和散热盘 Pt100 分别涂上硅油后插入加热黄铜盘和散热黄铜盘侧面的测温孔，并连接好加热电源导线（注意：Pt100 金属部分不要裸露在外，且插入深度要一致，否则影响实验的测温精度）。

3. 加热盘温度控制参数设置。

将加热盘温度设定在 70℃。具体操作详见实验仪器。

4. 加热盘加热及温度测控。

接通测定仪电源，将“加热开关”置于“开”，此时加热指示灯亮。在整个加热及温度控制过程中加热指示灯亮度会随着加热快慢而变化。注意实验应在室内温度基本稳定及无风的

条件下进行，否则将影响控温效果。当加热盘温度控制在 70±1℃时，若样品的上、下表面的温度 $T_1$ 和温度 $T_2$ 示值在 10min 后仍保持不变，即可认为已经达到了稳定状态。记录此时加热盘温度 $T_{10}$，散热盘温度 $T_{20}$，填入表 3-16-2 中(注意：实验时应在室内温度基本稳定及无风的条件下进行，否则会影响控温效果)。

5. 测定散热盘散热率。

在读取稳定时的 $T_{10}$ 和 $T_{20}$ 的温度后，移去样品，上加热盘直接放在散热盘上，继续散热盘加热，使散热盘温度高于 $T_{20}$ 10℃左右后再移去加热盘，关闭加热开关，让散热盘通过外表面直接向周围环境散热(自然冷却)。冷却过程中每隔 30s 读一次散热盘温度 $T_2$，一直读到低于 $T_{20}$ 10℃左右。将实验所得数据记录在表 3-16-2 中。

6. 实验完毕，将“风扇开关”置于“开”。此时风扇开启，“冷却指示”灯亮，使散热盘加速冷却。直到散热盘温度降至室温，将“风扇开关”置于“关”。

## 五、数据记录及处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

**表 3-16-1 测量样品实验数据**

| $h_1$/m | $h_2$/m | $R_1$/m | $R_2$/m | $m$/kg | $c$/(J·kg$^{-1}$·K$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $3.77\times10^2$ |

**表 3-16-2 散热盘散热率实验数据**

| $T_{10}$ | $t$/s | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_2$/(℃) | | | | | | | | | | |
| $T_{20}$ | $t$/s | 300 | 330 | 360 | 390 | 420 | 450 | 480 | 510 | 540 | 570 |
| | $T_2$/(℃) | | | | | | | | | | |

### 2. 数据处理(data processing)

1) 根据表 3-16-2 所记录实验数据，选择 $T_{20}$ 附近 10 组数据，用逐差法处理实验数据，计算散热盘冷却速率 $\left.\frac{dQ}{dt}\right|_{T_2=T_{20}}$。

2) 将散热盘冷却速率 $\left.\frac{dQ}{dt}\right|_{T_2=T_{20}}$ 的值代入 $\lambda=mc\left.\frac{dQ}{dt}\right|_{T_2=T_{20}}\cdot\frac{R_2+2h_2}{2R_2+2h_2}\cdot\frac{h_1}{T_{10}-T_{20}}\cdot\frac{1}{\pi R_1^2}$，计算待测样品导热系数 $\lambda$。

3) 分析实验误差原因。

## 六、注意事项(cautions)

1. 加热盘温度设定值不得高于 80℃，实验时应随时观察加热盘温度变化。
2. 实验装置温度较高，实验过程中不要触摸，以防烫伤。

3. PID 智能温度调节器出厂前各参数均设置好，实验时可以修改加热盘温度设定值 SV，修改其他参数时应谨慎，否则影响控温效果。

4. 实验过程中 Pt100 金属部分不要裸露在外，且插入深度要一致，否则影响测温精度。

5. 实验应在室内温度基本稳定及无风的条件下进行，否则将影响控温效果。

6. 测定仪面板上有 0～220V 加热电源，连接导线时应关闭电源，以防触电。

## 七、思考题(exercises)

1. 测定散热盘冷却速率时为什么要在稳态温度 $T_{20}$ 附近选值？
2. 样品的导热系数大小与温度有什么关系？
3. 样品的导热系数大小与导热性能有什么关系？

**关键词(key words)**

导热系数(thermal conductivity)，不良导体(poor conductor)，稳态法(steady-state method)，加热盘(heating plate)，散热率(heat-removal rate)

# 第4章

# 提高性实验

## 实验十七　模拟法描绘静电场

带电物体在空间形成的静电场，除极简单的情况外，大都不能求出它的数学表达式，往往需要借助实验的方法来测定。由于直接测量静电场是非常困难的，当静电仪表引入静电场中进行测量时，表针上就会有感应电荷出现，从而产生附加电场，它与原电场叠加，改变了被测电场，也影响了原带电体系的电荷分布。电磁场理论指出，静电场和稳恒电流场具有相同形式的数学方程式，因而这两个场具有相同形式的解，即电流场的分布与静电场的分布完全相似。为此我们可以用稳恒电流场来模拟静电场，且此时测量探针的引入不会造成模拟场的畸变，这样就可间接地测出被模拟的静电场。用电流场来测定静电场是研究静电场的实验方法之一。

模拟法的本质是用一种易于实现、便于测量的物理状态或过程去模拟不易实现、不便测量的物理状态或过程，要求这两种状态或过程有一一对应的物理量，且满足相似的数学形式和边界条件。本实验中用稳恒电流场来模拟静电场的分布。

### 一、实验目的(experimental purpose)

1. 学习用模拟法描绘静电场的原理和方法。
2. 用模拟法测绘静电场的分布，作出等势线和电力线。
3. 加深对电场强度和电场线、电位等概念的理解。

### 二、实验原理(experimental principle)

静电场由静电荷的分布决定，可以用电场强度 $E$ 和电位 $U$ 来表示，标量的测定比矢量更容易实现，所以一般可以先测绘静电场的等位线，然后根据电场线与等位线的关系画出电场线，从而反映静电场的分布情况。然而，对静电场进行直接测量是比较困难的，这一方面是由于静电场中无电流，一般的磁电式仪表不起作用，只能用静电式仪表进行测量，而静电式仪表不仅结构复杂，灵敏度也较低；另一方面是由于一旦将金属的探测电极放入电场中，

会引起原静电场的显著改变，使测量失去意义。因此，可以利用物理规律相似的特点，采用模拟法间接地测绘静电场。

模拟法是物理实验的常用方法之一，在科学研究和工程设计中也常常被采用。本实验用易于测量的稳恒电流场模拟静电场，这两种场满足相同的数学规律，在相同的边界条件下具有相同的解析解。

静电场的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 在无源区域满足以下积分关系：

$$\oint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \tag{4-17-1}$$

$$\oint_L \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = 0 \tag{4-17-2}$$

稳恒电流场的电流密度矢量 $\boldsymbol{j}$ 在无源区域内也满足类似的积分关系：

$$\oint_S \boldsymbol{j} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \tag{4-17-3}$$

$$\oint_L \boldsymbol{j} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = 0 \tag{4-17-4}$$

为了保证二者有相同的边界条件，应满足以下条件：

(1) 稳恒电流场中的电极与静电场中的导体几何形状相同；

(2) 稳恒电流场中的导电质与静电场中的电介质分布规律相同；

(3) 稳恒电流场中的导电质(不良导体)分布均匀，且电导率满足 $\sigma_{电极} \gg \sigma_{导电质}$，从而保证电极(良导体)的表面是一个近似的等势面。

下面以实例分析两种场的等效性。

**1. 同轴电缆的静电场及电势分布(electrostatic field and potential distribution of coaxial cable)**

如图 4-17-1 所示，在真空中有一半径为 $R_A$ 的无限长圆柱状导体 $A$ 和一内半径为 $R_B$ 的无限长筒状导体 $B$ 同轴放置，分别带等量异号电荷，设单位长度所带电荷为 $\lambda$。在垂直于轴线的任一截面内，电场 $E_r$ 分布情况相同，电场线为辐射状。

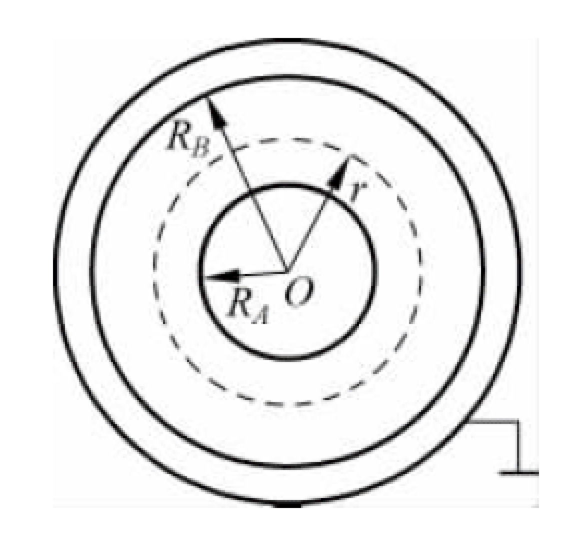


图 4-17-1　同轴电缆截面图

根据高斯定理，与轴线距离为 $r$ 处各点的电场强度大小为

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r} \tag{4-17-5}$$

设 $r=R_B$ 时，$U_B=0$，则有

$$U_A = \int_{R_A}^{R_B} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{R_B}{R_A} \Rightarrow \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0} = U_A/\ln\frac{R_B}{R_A} \tag{4-17-6}$$

利用式(4-17-6)可以得到电势的分布

$$\begin{aligned} U_r &= U_A - (U_A - U_r) = U_A - \int_{R_A}^{r} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} \\ &= U_A - \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r}{R_A} = U_A \ln\frac{R_B}{r}\Big/\ln\frac{R_B}{R_A} \end{aligned} \tag{4-17-7}$$

将式(4-17-6)代入式(4-17-5)可以得到电场的分布

$$E_r = \left(U_A \Big/ \ln\frac{R_B}{R_A}\right)\frac{1}{r} \tag{4-17-8}$$

**2. 同轴柱状电极间的电流及电势分布(current and potential distribution between coaxial columnar electrodes)**

若上述导体 $A$ 与 $B$ 之间充满了电导率为 $\sigma$ 的不良导体,$A$ 与 $B$ 分别与电源正负极相连,如图 4-17-2 所示,则 $A$,$B$ 之间将形成径向电流,建立稳恒电流场 $E'_r$,可以证明不良导体中的电场 $E'_r$ 与静电场 $E_r$ 是相等的。

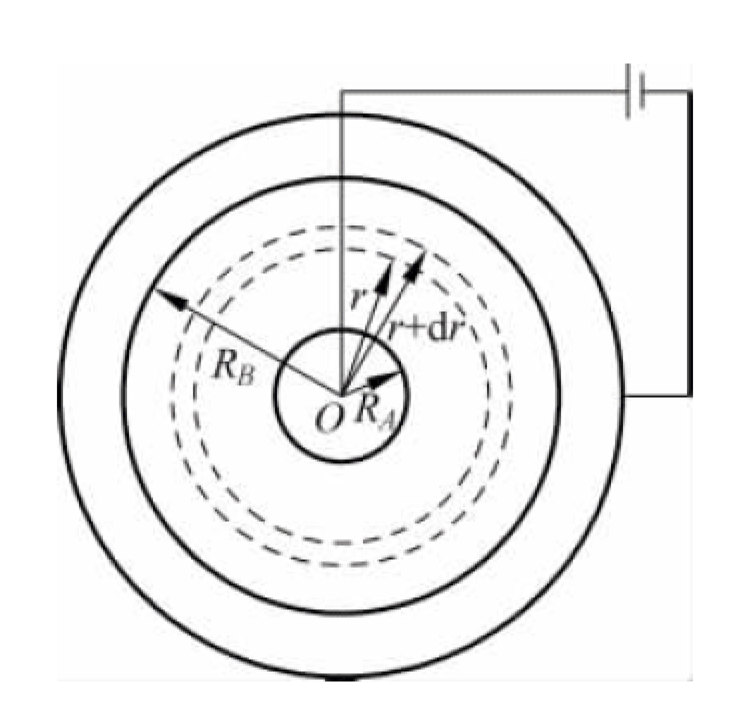


图 4-17-2 同轴柱状电极截面图

取一段长为 $t$ 的电极为研究对象,设材料电阻率为 $\rho(\rho=1/\sigma)$,则 $r$ 到 $r+\mathrm{d}r$ 之间的电阻为

$$\mathrm{d}R = \rho\frac{\mathrm{d}r}{S} = \rho\frac{\mathrm{d}r}{2\pi rt} = \left(\frac{\rho}{2\pi t}\right)\frac{\mathrm{d}r}{r} \tag{4-17-9}$$

不良导体的总电阻为

$$R_{AB} = \int_{R_A}^{R_B}\mathrm{d}R = \frac{\rho}{2\pi t}\ln\frac{R_B}{R_A} \tag{4-17-10}$$

半径 $r$ 处的电阻为

$$R_r = \int_r^{R_B}\mathrm{d}R = \frac{\rho}{2\pi t}\ln\frac{R_B}{r} \tag{4-17-11}$$

若两导体间所加电压为 $U_A$,则径向电流为

$$I = \frac{U_A}{R_{AB}} = \frac{2\pi t U_A}{\rho\ln(R_B/R_A)} \tag{4-17-12}$$

半径 $r$ 处的电势 $U'_r$ 为(设 $r=R_B$ 时 $U_B=0$)

$$U'_r = IR_r = U_A\ln\frac{R_B}{r}\Big/\ln\frac{R_B}{R_A} \tag{4-17-13}$$

相应的电场强度大小

$$E'_r = \left(U_A\Big/\ln\frac{R_B}{R_A}\right)\frac{1}{r} \tag{4-17-14}$$

由以上分析可见,$U_r$ 与 $U'_r$,$E_r$ 与 $E'_r$ 的分布函数相同,因此两种场等效。

由于稳恒电流场和静电场具有这种等效性,因此欲测绘静电场的分布,只要测绘相应的稳恒电流场的分布就行了。

## 三、实验仪器(experimental device)

双层静电场描绘仪、水槽电极、静电场描绘仪电源、连接线。

**1. 静电场描绘仪**

双层静电场描绘仪由电极架、电极(3 种水槽电极)、同步探针等组成,还有配套的静电场描绘仪电源。

静电场描绘仪示意图如图 4-17-3 所示,仪器的下层用于放置水槽电极,上层用于安放坐标纸,P 是测量探针,用于在水中测量等势点,P′是记录探针,可将 P 在水中测得的各电势点同步地记录在坐标纸上(打出印迹)。由于 P,P′是固定在同一探针架上的,所以两者绘出

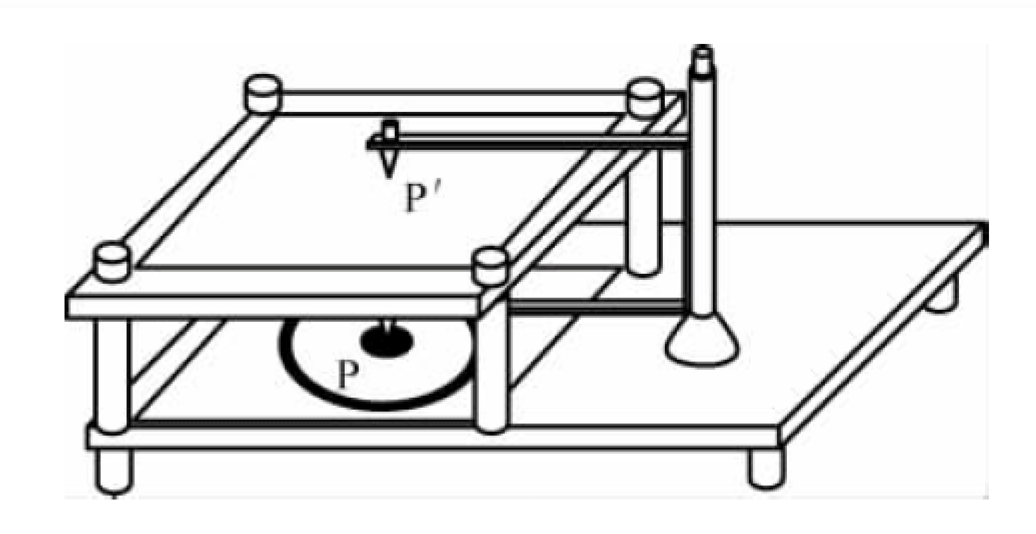



图 4-17-3　双层静电场描绘仪

的图形完全相同。

**2. 水槽电极**

本实验用的水槽电极为同轴圆柱电极，电极外形如图 4-17-4 所示。

**3. 同步探针**

同步探针由装在探针座上的两根同样长短的弹性簧片及装在簧片末端的两根细而圆滑的钢针组成，如图 4-17-5 所示。下探针深入水槽自来水中，用来探测水中电流场各处的电势数值，上探针略向上翘起，两探针处于同一铅直线上，当探针座在电极架下层右边的平板上自由移动时，上、下探针探出等势点后，用手指轻轻按下上探针上的揿钮，上探针针尖就在坐标纸上打出相应的等势点。

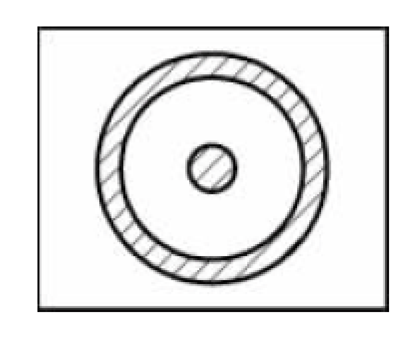


图 4-17-4　电极

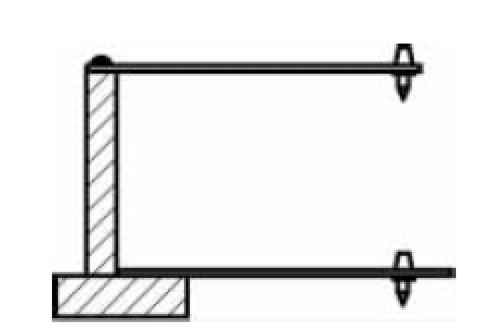


图 4-17-5　同步探针

## 四、实验内容（experimental content）

1. 取一张坐标纸，放在双层静电场测试仪上层的有机玻璃板上，用弹簧片将坐标纸压住。

2. 按图 4-17-6 接好电路，调节探针，保持下探针与导电板接触良好，上探针与坐标纸有 1～2mm 的距离。

3. 接通电源，调节直流稳压电流的输出电压，使电极 $A$ 的电势为 6V（设电极 $B$ 的电势为零）。

4. 滑动可变电阻器 $R$，使伏特表 $V_2$ 的读数为 5V，移动探针位置，使检流计 G 指针为零，则该点的电势为 5V，用上探针扎孔为记。同理，再找到电势为 5V 的等势点多个，扎孔为记，从而形成较明显的圆形。

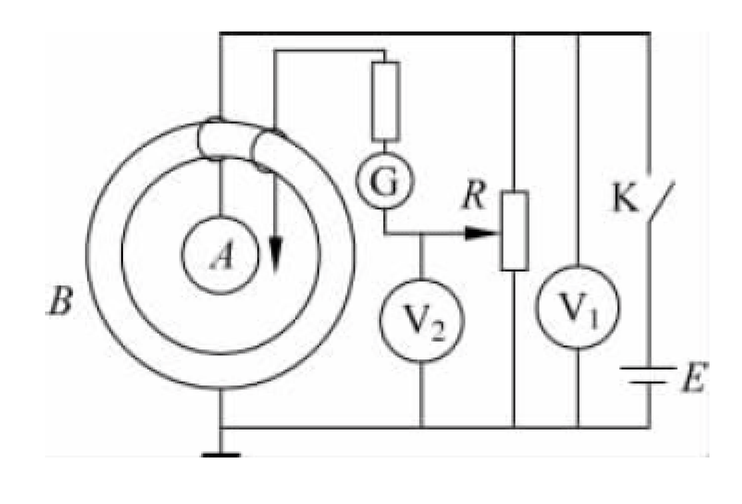



图 4-17-6　模拟法描绘静电场测量电路图

5. 使电压表 $V_2$ 的读数分别为 4V，3V，2V 和 1V，重复步骤 4。

6. 把多个点连成等势线（应是圆），确定圆心 $O$ 的位置，量出各条等势线的半径 $r$，并分

别求其平均值。

7. 用游标卡尺分别测量电极 $A$ 和 $B$ 的半径 $R_A$ 和 $R_B$(或由实验室给出)。

8. 测试结束关闭电源,整理好导线和电极。

## 五、数据处理(data processing)

1. 按式(4-17-7)计算各相应半径 $r$ 处的电势的理论值 $V_{理}$,并与实验值比较,计算相对误差。

2. 以 $\ln r$ 为横坐标,$U_{实}$ 为纵坐标,作 $U_{实}$-$\ln r$ 曲线,并与 $U_{理}$-$\ln r$ 曲线比较。

## 六、注意事项(cautions)

1. 水盘内各处水深要相同,但不要太深,以 5mm 左右为宜。

2. 测绘前先分析一下电极周围等势线的形状,以及是否具有对称性,对等势点的位置作一估计,以便有目的地进行探测。

3. 操作时,右手平稳地移动探针架,同时注意保持探针 P,P′处于同一铅垂线上,以免测绘结果失真。

4. 为保证测绘的准确性,每条等势线上不得少于 10 个测量点。

## 七、思考题(exercises)

1. 电极和导电纸接触的好坏对实验结果有何影响?

2. 在实验装置中,如果电源电压增大一倍,等势线和电场线的形状是否变化? 电场和电势的分布是否发生变化?

3. 为什么同轴电缆的静电场与同轴柱状电极的电流场中的电势、电场分布情况完全相同?

4. 分析模拟装置与理论上要求的符合与不足之处,指出影响结果的主要因素。

**关键词(key words)**

静电场(electrostatic field),等势线(equipotential line),模拟法(simulation method),电极(electrode)

# 实验十八　菲涅耳双棱镜干涉

频率相同、振动方向相同、相位不随时间而变化的两列光波相遇，在叠加的区域内，光的强度明暗有稳定的分布，这种现象称为光的干涉。法国科学家菲涅耳在 1826 年进行的双棱镜实验，证明了光的干涉现象的存在，为波动光学奠定了坚实的基础。菲涅耳双棱镜实验与杨氏双缝实验、洛埃镜实验都是用分波阵面法产生双光束干涉的，它用毫米级的测量仪器得到纳米级的精度，其物理思想、实验方法与测量技巧至今仍值得我们学习。用双棱镜观察光的干涉，并测量钠光波长是一个典型、重要的光学实验，它对理解光的波动性具有重要的意义。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 观察双棱镜干涉现象并测定光波波长。
2. 观察菲涅耳双棱镜产生的双光束干涉现象，进一步理解产生干涉的条件。
3. 学会测微目镜的调节与使用。

## 二、实验原理（experimental principle）

利用光的干涉现象进行光波波长的测量，首先要获得两束相干光，使之重叠形成干涉，干涉条纹的空间分布既跟条纹与相干光源之间的相对位置有关，又与光波波长有关，从它们之间的关系就能测出光波波长。

本实验利用双棱镜获得两束相干光，如图 4-18-1 所示，双棱镜是由两块底边相接、折射棱角 $\alpha$ 小于 $1^\circ$ 的直角棱镜组成的，从单缝 $S$ 发出的单色光的光波投射到双棱镜上时，经双棱镜折射后，其波前便分割成两部分，形成沿不同方向传播的两束相干光。通过双棱镜观察这两束光，就好像它们是由虚光源 $S_1$ 和 $S_2$ 发出的一样，于是在两束光相互交叠的区域内产生了干涉。如果缝的宽度较小且双棱镜的棱脊和光源狭缝平行，便可在该区域内放置的屏上观察到平行于狭缝的等间距干涉条纹。

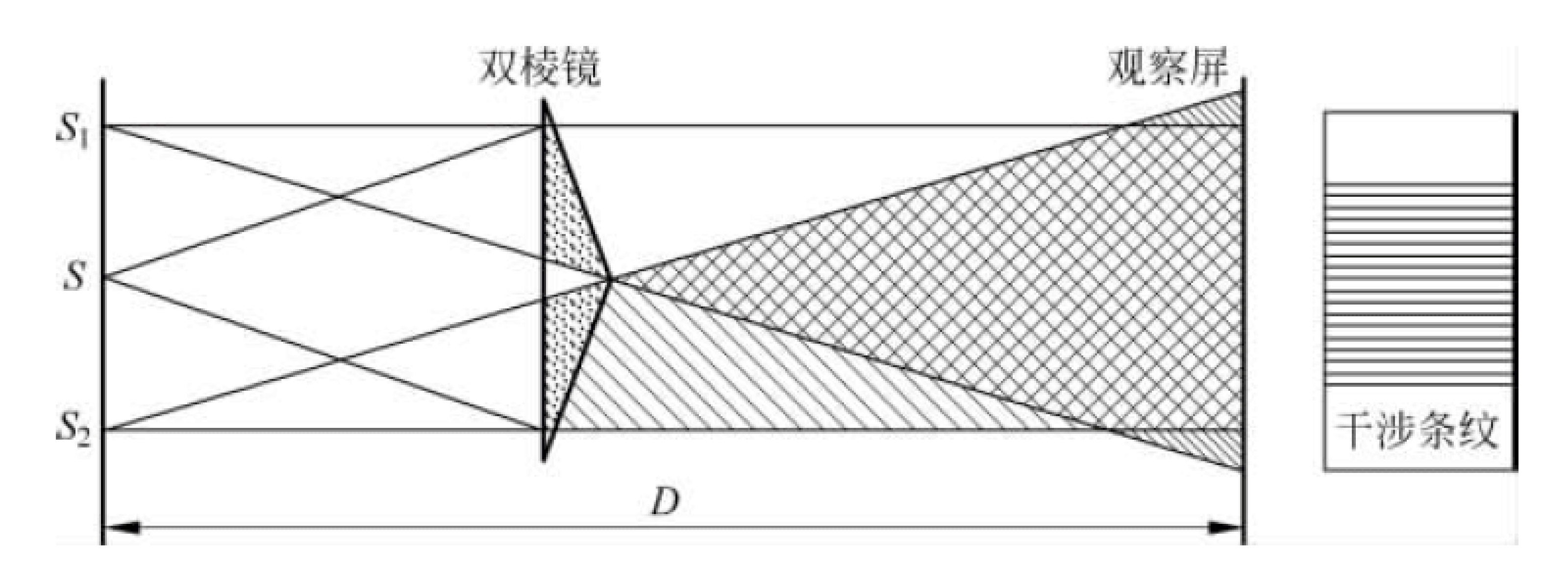



图 4-18-1　菲涅耳双棱镜光路图

如图 4-18-2 所示，设 $S_1$ 和 $S_2$ 的间距为 $d$，缝 $S$ 至观察屏的距离为 $D$，$O$ 为观察屏上距 $S_1$ 和 $S_2$ 等距的点。由 $S_1$ 和 $S_2$ 射来的两束光在 $O$ 点得光程差为零，故在 $O$ 点处两光波互相加强形成零级亮条纹，而在 $O$ 点两侧，则列着明暗相间的等距干涉条纹。

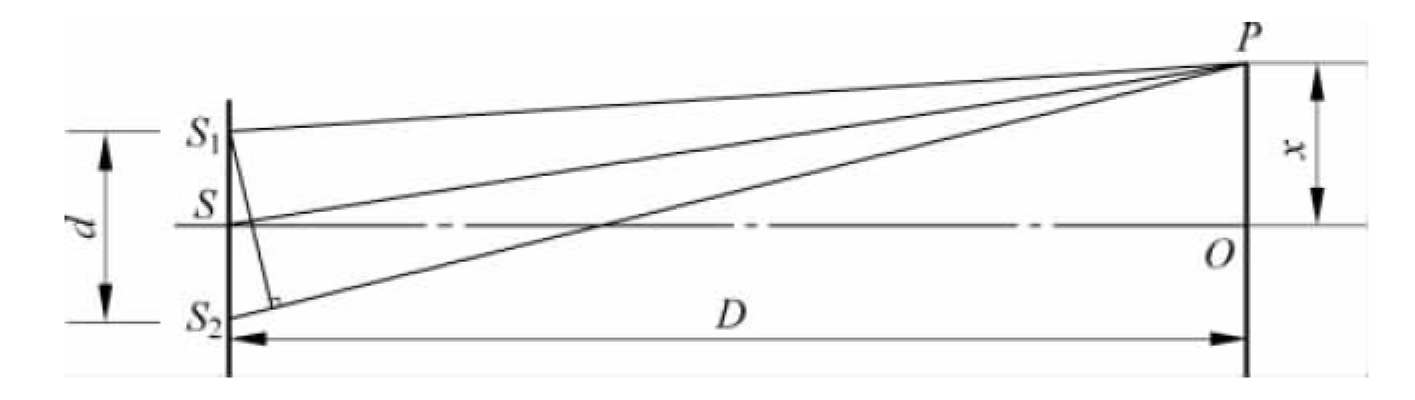



图 4-18-2 菲涅耳原理图

对于屏上距 $O$ 点为 $x$ 的 $P$ 点，当 $D\gg d$，$D\gg x$ 时，有光程差 $\delta/d=x\sqrt{SP}$，因为 $\overline{SP}\approx D$，故 $\delta/d\approx x/D$，即 $\delta=xd/D$。

根据相干条件，当光程差 $\delta$ 满足：

(1) $\delta=2k\left(\frac{\lambda}{2}\right)$时，即在 $x=\frac{D}{d}k\lambda(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$处，产生亮条纹。

(2) $\delta=(2k-1)\left(\frac{\lambda}{2}\right)$时，即在 $x=\frac{D}{d}(2k-1)\frac{\lambda}{2}(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$处，产生暗条纹。

因此，两相邻亮条纹(或暗条纹)间距为

$$\Delta x=x_{k+1}-x_k=\frac{D}{d}\lambda \tag{4-18-1}$$

由式(4-18-1)可得

$$\lambda=\frac{D}{d}\Delta x \tag{4-18-2}$$

式中 $d$ 为两个狭缝中心的间距，$\lambda$ 为单色光波波长，$D$ 为狭缝屏到观测屏的距离。由式(4-18-2)可知，只要测得 $D$，$d$ 以及 $\Delta x$，便可计算出光波波长 $\lambda$。

## 三、实验仪器(experimental device)

菲涅耳双棱镜、钠光灯、凸透镜、二维调整架、单面可调夹缝、测微目镜、二维底座、一维底座、通用底座。

测微目镜结构图如图 4-18-3 所示。测微目镜的主尺是刻线玻璃标尺，刻线分度为 1mm。标尺下方的分划板与读数鼓轮相连，当旋转读数鼓轮时，分划板会左右移动，鼓轮分度值为 0.01mm。图 4-18-3(b)所示为目镜中的视场。测微目镜使用方法如下：

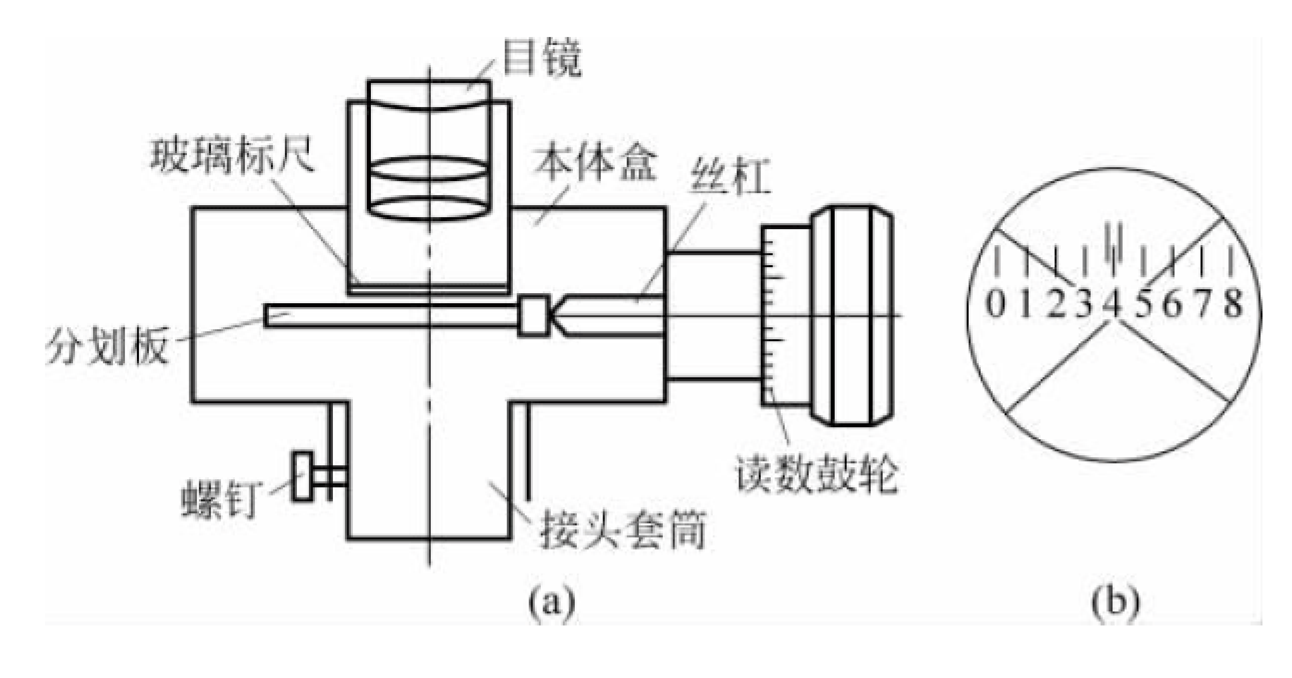



图 4-18-3 测微目镜结构图

(1) 测量微小实像时,先调节目镜调焦,直至能清晰地观察到分划板上的叉丝。

(2) 调节测微目镜与待测实像的距离,使实像也清晰,并与叉丝无视差。

(3) 旋转鼓轮,使叉丝对准待测像的一边,记录下此时标尺和鼓轮的读数。

(4) 再旋转鼓轮,使叉丝对准待测像的另一边,记录下标尺和鼓轮的读数。

(5) 将前后两次的读数相减,即得待测像的长度。

## 四、实验内容(experimental content)

### 1. 调节共轴

(1) 将钠光灯、会聚透镜 $L$、狭缝 $S$、双棱镜与测微目镜按照图 4-18-4 所示的顺序放置在平台上,用目视粗略地调整它们的中心等高、共轴,双棱镜底面与系统光轴垂直,棱脊和狭缝的方向大体平行。

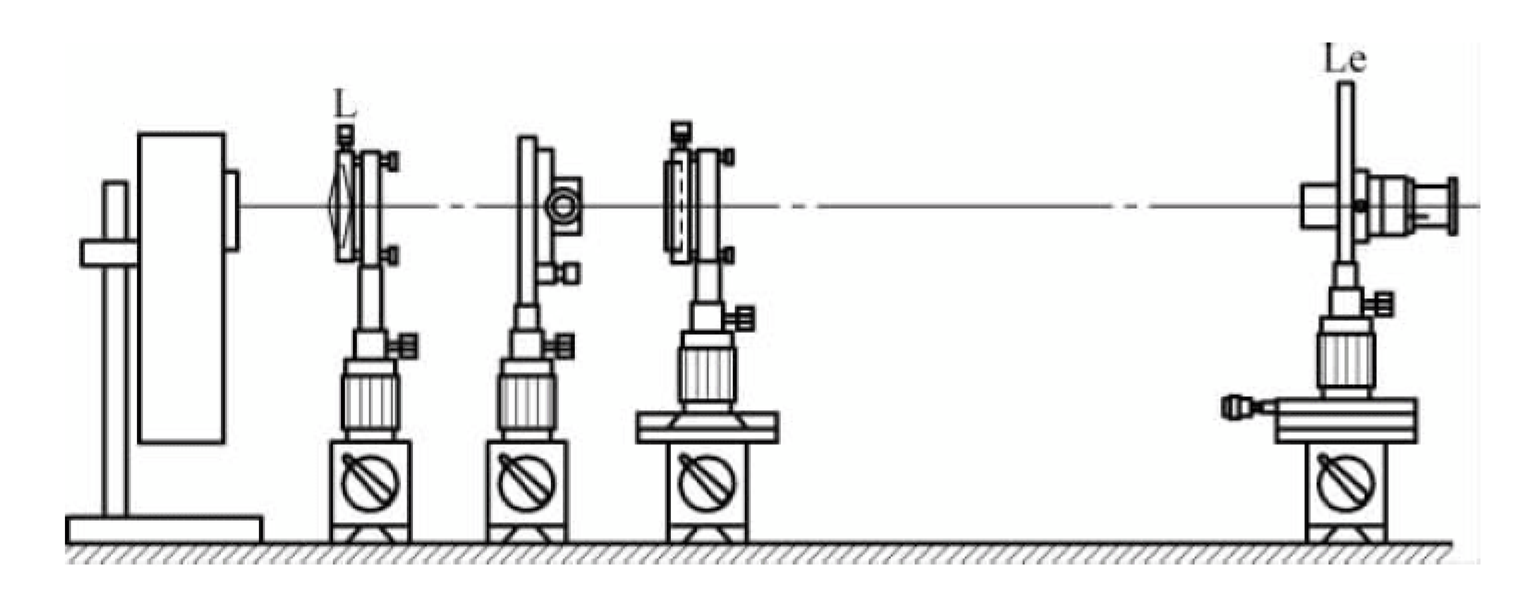



图 4-18-4　菲涅耳双棱镜干涉实验装置图

(2) 开启钠光灯,通过透镜照亮狭缝 $S$,在双棱镜后放一白屏,从白屏上可看到一条光带,此光带就是两束相干光的交叠区。用测微目镜代替白屏,调节目镜高低和左右位置,使光带能进入测微目镜视场,且使两虚光源的两个实像 $S_1'$ 和 $S_2'$ 位于视场的中心位置。

### 2. 调节干涉条纹

(1) 减小狭缝的宽度,一般情况下,可从测微目镜中观察到不太清晰的干涉条纹。

(2) 绕系统光轴缓慢地向右或向左旋双棱镜,将会出现清晰的干涉条纹。这时棱镜的棱脊与狭缝的方向严格平行。

(3) 看到清晰的干涉条纹后,将双棱镜或测微目镜前后移动,使干涉条纹的宽度适当,同时在不影响条纹清晰度的情况下,适当地增加缝宽,以保持干涉条纹有足够的亮度。但双棱镜和狭缝的距离不宜过小,因为减小它们的距离,$S_1S_2$ 间距也会减小,不利于 $d$ 的测量。

### 3. 测量

(1) 用测微目镜测出干涉条纹的间距 $\Delta x$。

为了提高测量精度,可先测出 10 个干涉条纹的间距。测量时,先使目镜叉丝对准某亮纹的中心,然后旋转读数鼓轮,使叉丝移过 10 个条纹,读出两次读数。重复上述步骤,记录数据。

(2) 用米尺量出狭缝到测微目镜叉丝平面的距离 $D$,多次测量,并记录数据。

(3) 用二次成像法测出两个虚光源的间距 $d$。二次成像法为:保持图中狭缝、双棱镜原来的位置不变,加入一已知焦距 $f=150\text{mm}$ 的透镜放在双棱镜后,使单缝与测微目镜间的

距离 $D>4f$，移动透镜成像时，可以在两个不同的位置上，从目镜中看到一大一小两个清晰的缝像（即虚光源 $S_1$，$S_2$ 的像），测出两个清晰的像间距 $d_1$ 和 $d_2$。根据物像公式，虚光源 $S_1$，$S_2$ 的间距 $d=\frac{S_1}{S_1'}d_1$（第一成像），$d=\frac{S_2}{S_2'}d_2$（第二次成像），而 $S_1=S_1'$，$S_2=S_2'$，故

$$d^2=\frac{S_1}{S_1'}\frac{S_2}{S_2'}d_1d_2 \tag{4-18-3}$$

由上式可求得两虚光源的间距

$$d=\sqrt{d_1d_2} \tag{4-18-4}$$

## 五、数据记录与数据处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

(1) 记录所测得的干涉条纹间距 $\Delta x$。

(2) 记录狭缝到测微目镜叉丝平面的距离 $D$。

(3) 记录实验所测得的像间距 $d_1$ 和 $d_2$。

### 2. 数据处理(data processing)

(1) 将实验测得的 $d_1$ 和 $d_2$ 的值代入式(4-18-4)算出两虚光源的间距 $d$。

(2) 然后根据式(4-18-2)计算出光波波长 $\lambda$。

(3) 将实验算出的波长 $\lambda$ 与钠光灯的波长实际值进行比较，并分析误差原因。

## 六、注意事项(cautions)

1. 使用测微目镜时，首先要确定测微目镜读数装置的最小分度；必须沿一个方向旋转读数鼓轮，以免产生空程误差；旋转读数鼓轮时动作要平稳、缓慢；测量装置要保持稳定。

2. 调节共轴时，可用白屏观察双缝所产生的光束亮度是否均匀，狭缝宽度必须适当。

3. 在测量光源狭缝至观察屏的距离 $d$ 时，因为狭缝平面和测微目镜的分划板平面均不与读数准线共面，必须进行相应的修正。

## 七、思考题(exercises)

1. 在实验时，双棱镜和光源之间为什么要放一狭缝？为什么狭缝要很窄才可以获得清晰的干涉条纹？

2. 双棱镜是怎样实现双光束干涉的？干涉条纹是怎样分布的？

3. 如何快速调好菲涅耳干涉系统的共轴？要获得明暗对比度好的干涉条纹，实验过程中如何实现？

**关键词(key words)**

菲涅耳双棱镜(Fresnel biprism)，干涉(interference)，明纹(bright fringes)，暗纹(dark fringes)，光程差(optical length difference)，波长(wavelength)

# 实验十九　单缝衍射实验

光的衍射是光波动性的证明，同时衍射现象也有很多的实际应用，如测量微小的间隔、位移和尺寸等。计算衍射要取近似，其中夫琅禾费衍射是一种较简单的近似，要求光源到接收屏和衍射屏都是无限远，衍射图样为明暗相间的条纹且不随距离的改变而改变，通过测量中央明条纹宽度可以得到单缝缝宽。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 观察单缝衍射现象及其特点；
2. 应用单缝衍射的规律计算单缝缝宽。

## 二、实验原理(experimental principle)

单色平行光垂直照射宽度为 $a$ 的狭缝 $AB$(如图 4-19-1 所示，其中将缝宽放大约百倍)，按惠更斯原理，$AB$ 面上各子波源的球面波向各方向传播，在出发处，相位相同。其中沿入射方向传播的，经透镜 $L$ 会聚于 $P_0$ 处时，仍然同相，故加强为中央亮纹；与入射方向成 $\varphi$ 角传播的，经 $L$ 会聚于 $P_k$，其明暗取决于各次级波线的光程差。从 $A$ 点作 $AC$ 线垂直于 $BC$，从 $AC$ 线到达 $P_k$ 点的所有波线都是等光程的。沿缝宽各波线之间的光程差取决于从 $AB$ 到 $AC$ 之间的路程，而最大光程差

$$BC = a\sin\varphi \tag{4-19-1}$$

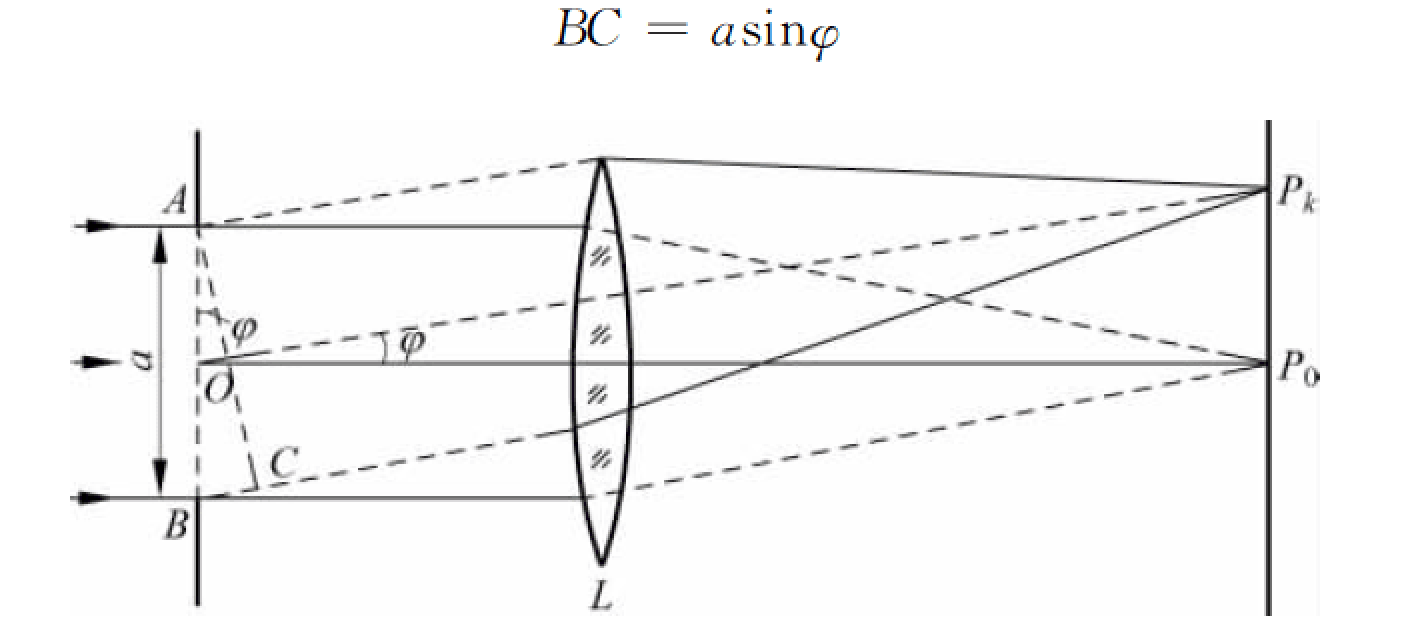



图 4-19-1　单缝衍射原理示意图

$P_k$ 点干涉条纹的亮暗由 $BC$ 值决定，若用相距 $\frac{\lambda}{2}$ 的许多平行于 $AC$ 的平面分割 $BC$，同时也就将狭缝面上的波阵面分成一些等面积的部分，即菲涅耳半波带，于是两个相邻半波带的对应点发出的波线到达 $AC$ 面时的光程差均为 $\frac{\lambda}{2}$，相位差为 $\pi$，经 $L$ 会聚后仍为 $\pi$，故强度互相抵消。据此推断：对应某确定的 $\varphi$ 方向，若单缝波阵面可分成偶数个半波带时 $P_k$ 处必为暗条纹；若单缝波阵面可分成奇数个半波带，$P_k$ 处将有明条纹；若半波带为非整数所对应的方位上，强度则在明暗之间。总之，当 $\varphi$ 满足

$$a\sin\varphi = 2k\frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (k = \pm 1, \pm 2L) \qquad (4\text{-}19\text{-}2)$$

时产生暗条纹；当 $\varphi$ 满足

$$a\sin\varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = \pm 1, \pm 2L) \qquad (4\text{-}19\text{-}3)$$

时产生明条纹。而零级明条纹范围，通常认为是从

$$a\sin\varphi = \lambda \text{ 到 } a\sin\varphi = -\lambda$$

设中央零级明条纹宽度为 $e$，$L$ 的像方焦距为 $f'$，对 1 级暗条纹，近似有

$$\lambda f' = a\frac{e}{2} \qquad (4\text{-}19\text{-}4)$$

## 三、实验仪器（experimental device）

导轨、半导体激光器、衍射板、透镜、偏振片、测微目镜。

## 四、实验内容（experimental content）

实验主要内容是观察单缝衍射现象，测量单缝衍射的光强分布，并计算出缝宽 $a$。

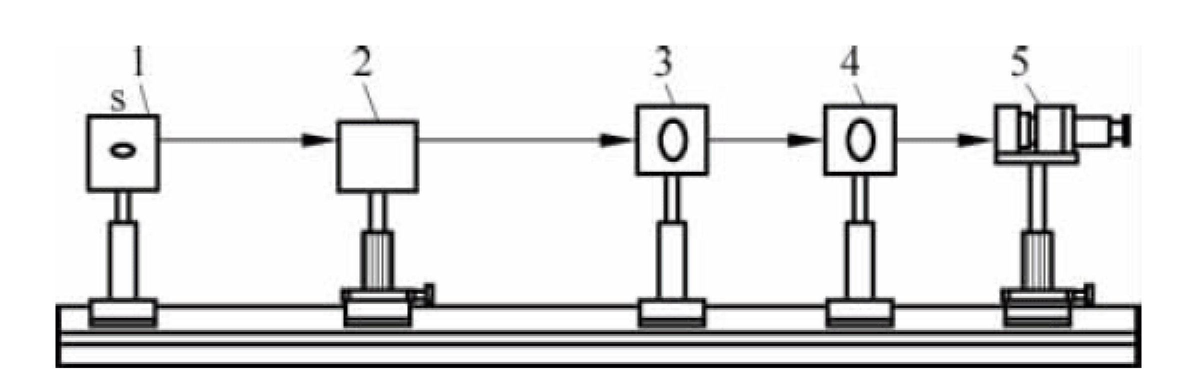



图 4-19-2 单缝衍射实验装置

1—半导体激光器；2—衍射板；3—透镜；4—偏振片；5—测微目镜

1. 在导轨上按图 4-19-2 所示的实验装置放置好各种光学器件。
2. 打开激光器，并将光路调节共轴。
3. 用激光垂直照射衍射板的狭缝，用透镜将衍射光束汇聚到白屏上，调节透镜与观察屏的位置，尽量使屏上的衍射条纹清晰。
4. 在透镜后加入偏振片和测微目镜，旋转偏振片使入射到测微目镜的光线最弱，通过测微目镜观察衍射条纹。
5. 用测微目镜测量中央明条纹宽度 $e$，然后将测得数据连同已知的 $\lambda$ 和 $f'$ 值代入公式(4-19-4)，便可算出缝宽 $a$，(实验所用激光波长为 650nm)。
6. 用显微镜直接测量缝宽，并与步骤 4 所得的结果进行比较。
7. 用测微目镜可验证中央极大宽度是次极大宽度的两倍。

## 五、数据记录与数据处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

记录中央明条纹的宽度 $e$ 及 $f'$ 的值。

**2. 数据处理(data processing)**

(1) 将实验测得的数据代入式(4-19-4)计算出单缝宽度 $a$,并与实验用显微镜直接测得的宽度进行比较。

(2) 验证中央极大宽度是次极大宽度的两倍。

## 六、注意事项(cautions)

1. 开始实验前,需要先将各个部件调整为同轴;调节时,要使各器件的轴心等高,保持各器件之间平行。

2. 各光学器件镜面不要用手触摸,如需清洁,可用洁净的脱脂棉球蘸上酒精轻轻擦拭。

3. 不要用眼睛直视激光束,以免损伤眼睛。

4. 光学器件均为玻璃制品,请轻拿轻放。

## 七、思考题(exercises)

1. 当缝宽增加一倍时,衍射花样的光强和条纹宽度将会怎样改变?如缝宽减半,又怎样改变?

2. 如果所采用的光源不是激光而是白光,那么接收屏上还能够出现衍射图样吗?为什么?

3. 如果将半导体激光器更换为 He-Ne 激光器,结果又会如何?

**关键词(key words)**

衍射(diffraction),菲涅耳半波带(Fresnel half-wave-zone),光波(light wave),场强分布(field intensity distribution),单缝(single slit)

# 实验二十 偏振光的研究

光的偏振是指光的振动方向与光的传播方向的不对称性。偏振现象是证明光为横波的最有力的证据，在科学上具有极其重要的意义。它不但丰富了光的波动说的内容，而且具有重要的应用价值。

自然光是各方向的振幅相同的光，对自然光而言，它的振动方向在垂直于光的传播方向的平面内可取所有可能的方向，没有一个方向占有优势。若把所有方向的光振动都分解到相互垂直的两个方向上，则在这两个方向上的振动能量和振幅都相等。线偏振光是在垂直于传播方向的平面内，光矢量只沿一个固定方向振动。起偏器是将非偏振光变成线偏振光的器件；检偏器是用于鉴别光的偏振状态的器件。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 通过观察光的偏振现象，加深对光波传播规律的认识。
2. 掌握产生和检验偏振光的方法。
3. 了解产生与检验偏振光的元件和仪器。
4. 用 1/4 波片产生并检验圆偏振光和椭圆偏振光。

## 二、实验仪器（experimental device）

光点检流计、起偏器、检偏器、1/4 波片、1/2 波片、光电转换装置、带小孔光屏、半导体激光器。

## 三、实验原理（experimental principle）

由于光波是横波，所以光矢量总是与光的传播方向垂直。在与传播方向垂直的平面内，光矢量可能有各种不同的振动状态，我们称之为光的偏振态。光大体上有五种偏振态，即线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光、自然光和部分偏振光。而线偏振光和圆偏振光又可看作椭圆偏振光的特例。

### 1. 马吕斯定律（Marius’s law）

从自然光获得偏振光的过程叫起偏，起偏的最简单方法是让自然光通过一块偏振片，其透过的光就成为线偏振光，这块偏振片叫起偏器。使用另一块偏振片来检验偏振光，用来检验偏振光的装置称为检偏器。如果检偏器的偏振化方向与起偏器的偏振化方向相同，则透过的光强最大。如果把检偏器转过 90°，则透射光强为零。对于检偏器与起偏器的偏振化方向的夹角为任意角度，若入射到检偏器上的线偏振光强度为 $I_0$，出射的光强为 $I$，由于光强与振幅平方成正比，透射光强为

$$I = I_0 \cos^2\theta \tag{4-20-1}$$

式中 $\theta$ 为入射光偏振方向与检偏器偏振轴之间的夹角。显然，当以光线传播方向为轴转动

检偏器时，透射光强度 $I$ 将发生周期性变化。当 $\theta=0°$时，透射光强度最大；当 $\theta=90°$时，透射光强度最小（消失状态）；当 $0°<\theta<90°$时，透射光强度介于最大值和最小值之间。因此，根据透射光强度变化的情况，可以区别光的不同偏振状态。

**2. 波晶片（wave plate）**

表面与光轴平行的晶体薄片称为波晶片，波片通常是用方解石或石英等单轴晶体按需要的厚度切割而成的。当平行光垂直入射晶面时，从波片射出的 e 光和 o 光不会分开，但两者有一定的相位差。设波片的厚度为 $d$，e 光和 o 光的主折射率分别为 $n_e$ 和 $n_o$，则两束光从波片射出后的相位差可表示为

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(n_o-n_e)d \tag{4-20-2}$$

由此可见，改变波片的厚度 $d$，可以获得两光束之间的不同相位差。

若波片的厚度 $d$ 使 e 光和 o 光产生 $\pi/2$ 的相位差，此波片称为该波长的 1/4 波片。同样，若波片的厚度 $d$ 使 e 光和 o 光产生 $\pi$ 的相位差，此波片称为该波长的 1/2 波片或半波片。

椭圆偏振光和圆偏振光可以看成是两个相互垂直的线偏振光的合成。这两个相互垂直的线偏振光可表示为

$$E_x=A_1\cos\omega t \tag{4-20-3}$$

$$E_y=A_2\cos(\omega t+\varphi) \tag{4-20-4}$$

式(4-20-4)中 $\varphi\neq0,\pm\pi$。分析表明：当 $\sin\varphi>0$ 时，迎着光的传播方向观察，光矢量端点沿顺时针方向旋转，称为右旋椭圆偏振光。当 $\sin\varphi<0$ 时，迎着光的传播方向观察，光矢量的端点沿逆时针方向旋转，称为左旋椭圆偏振光。当 $\varphi=0,\pm\pi$ 时，椭圆偏振光退化为线偏振光。如果 $A_1=A_2$，当 $\varphi=\pi/2$ 时，对应于右旋圆偏振光，当 $\varphi=-\pi/2$ 时，对应于左旋圆偏振光。

反过来，对于线偏振光，由于它可以分解为分别沿 o 光，e 光方向，相位相同的两个线振动，若经过 1/4 波片后，这两个振动相位差为 $\pi/2$，所以多数情形下出射的是椭圆偏振光，在特殊情形下也可能是圆偏振光或线偏振光。

## 四、实验内容（experimental content）

**1. 定偏振片光轴**

把所有器件按图 4-20-1 的顺序摆放在平台上，调至共轴。旋转第二个偏振片，使起偏器的偏振轴与检偏器的偏振轴相互垂直，这时可看到消光现象。

**2. 考察平面偏振光通过 $\lambda/2$ 波长时的现象**

(1) 在两块偏振片之间插入 $\lambda/2$ 波长片，把 $x$ 轴旋转架转动 360°，能看到几次消光？解释这现象。

(2) 将 $\lambda/2$ 波长片转任意角度，破坏消光现象。再将检偏器转动 360°，观察到什么现象？由此说明通过 $\lambda/2$ 波长片后，光变为怎样的偏振状态？

(3) 仍使起偏器和检偏器处于正交（即处于消光现象时），插入 $\lambda/2$ 波长，使消光，再将其转 15°，破坏其消光。转动检偏器至消光位置，并记录检偏器所转动的角度。

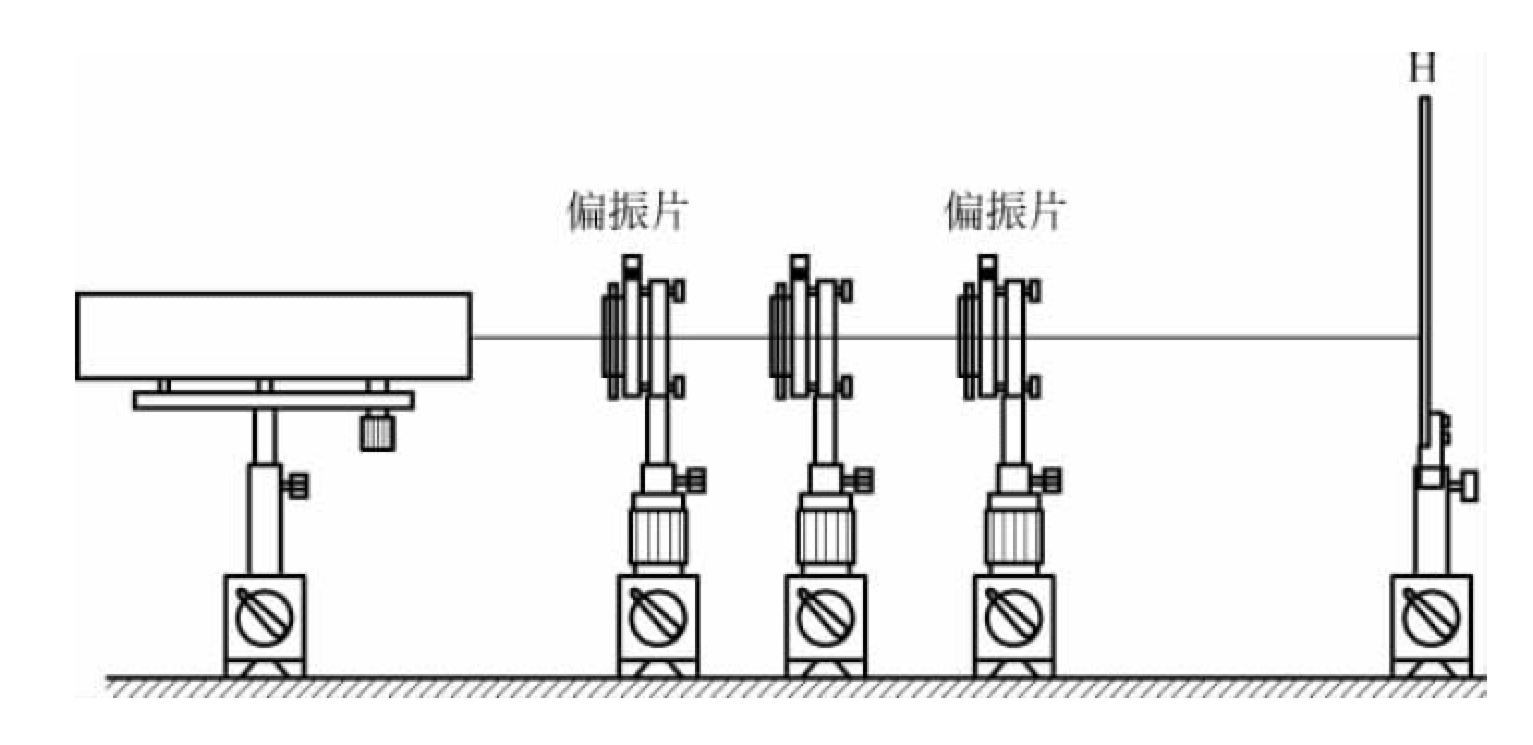



图 4-20-1 实验装置图

(4) 继续将 λ/2 波长转 15°(即总转动角为 30°),记录检偏器达到消光所转总角度。依次使 λ/2 波长总转角为 45°,60°,75°,90°,记录检偏器消光时所转总角度,并将数据填入表 4-20-1。

**3. 用 λ/4 波长片产生圆偏振光和椭圆偏振光**

(1) 按图 4-20-1 仍使起偏器和检偏器正交,用 λ/4 波长片代替 λ/2 波长片,转动插入的 λ/4 波片使之仍保持消光。

(2) 再将 λ/4 波片转动 15°,然后将检偏器转动 360°,观察光强的变化。你认为这时从 λ/4 波片出来光的偏振状态是怎样?

(3) 依次将转动总角度为 30°,45°,60°,75°,90°,每次将检偏器转动 360°,观察光强变化,记录所观察到的现象,并由此说明 λ/4 波片的出射光的偏振情况,并将现象填入表 4-20-2。

## 五、数据记录与处理(data recording and processing)

**1. 数据记录(data recording)**

(1) 平面偏振光通过 λ/2 波长时的现象

**表 4-20-1 半波片的实验**

| 半波片转动角度/(°) | 检偏器转动角度/(°) |
|---|---|
| 15 | |
| 30 | |
| 45 | |
| 60 | |
| 75 | |
| 90 | |

思考:从上面实验结果能总结出什么规律?

（2）观察 λ/4 波片的出射光的偏振情况

**表 4-20-2 λ/4 波片的实验**

| λ/4 波片转动的角度/(°) | 检偏器转动 360°观察到的现象 | 光的偏振性质 |
| --- | --- | --- |
| 15 | | |
| 30 | | |
| 45 | | |
| 60 | | |
| 75 | | |
| 90 | | |

**2. 数据处理(data processing)**

本实验是一个以观察为主的实验，要求对实验中观察到的现象作详细的记录、分析和总结。

## 六、注意事项(cautions)

1. 光学元件应轻拿轻放，同时，保护好光学元件的光学表面，不得用手触摸光学元件的光学表面，使用完毕后应按规定的位置放置好光学元件。
2. 注意用电安全。

## 七、思考题(exercises)

1. 有四束光它们的偏振态分别是：线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光和自然光，怎样鉴别它们?
2. 回答本节实验内容中所提出的问题。
3. 解释本节实验中出现各种情况的原因。

**关键词(Key words)**

偏振光(polarized light)，起偏(polarize)，自然光(natural light)，部分偏振光(partially polarized light)，线偏振光(linearly polarized light)，圆偏振光(circularly polarized light)，椭圆偏振光(elliptically polarized light)，起偏器(polarizer)，检偏器(analyzer)

# 实验二十一　硅光电池的偏置电路与特性参数测量

光电池是一种光电转换元件，它不需外加电源就能直接把光能转换为电能。光电池的种类很多，常见的有硒、锗、硅、砷化镓、氧化铜、硫化铊、硫化镉等。其中最受重视、应用最广的是硅光电池。它有一系列的优点：性能稳定、光谱范围宽、频率响应好、转换效率高、能耐高温辐射等，而且它的光谱灵敏度与人眼的灵敏度最相近。所以，它在很多分析仪器、测量仪器、曝光表以及自动控制检测、计算机的输入和输出上被用作探测元件，在现代科学技术中占有十分重要的地位。

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 学习掌握光电池的 3 种偏置电路；
2. 测量硅光电池 3 种偏置电路下表现出的特性。

## 二、实验原理(experimental principle)

硅光电池与光电二极管类似，具有光生伏特器件的特性，是典型的 P-N 结型光生伏特器件。不同之处是它的光敏面积大于光电二极管的，P，N 结型材料的掺杂浓度较高，内阻较小，便于向负载供电。

### 1. 自偏置电路(self-biased circuit)

硅光电池的自偏置电路的实验电路如图 4-21-1(a)所示，用数字电压表测量硅光电池两端的电压，用微安表测量流过硅光电池的电流。显然，加在硅光电池两端的偏置电压由光生电流在负载电阻上产生的压降提供，因此，称其为自偏置电路。

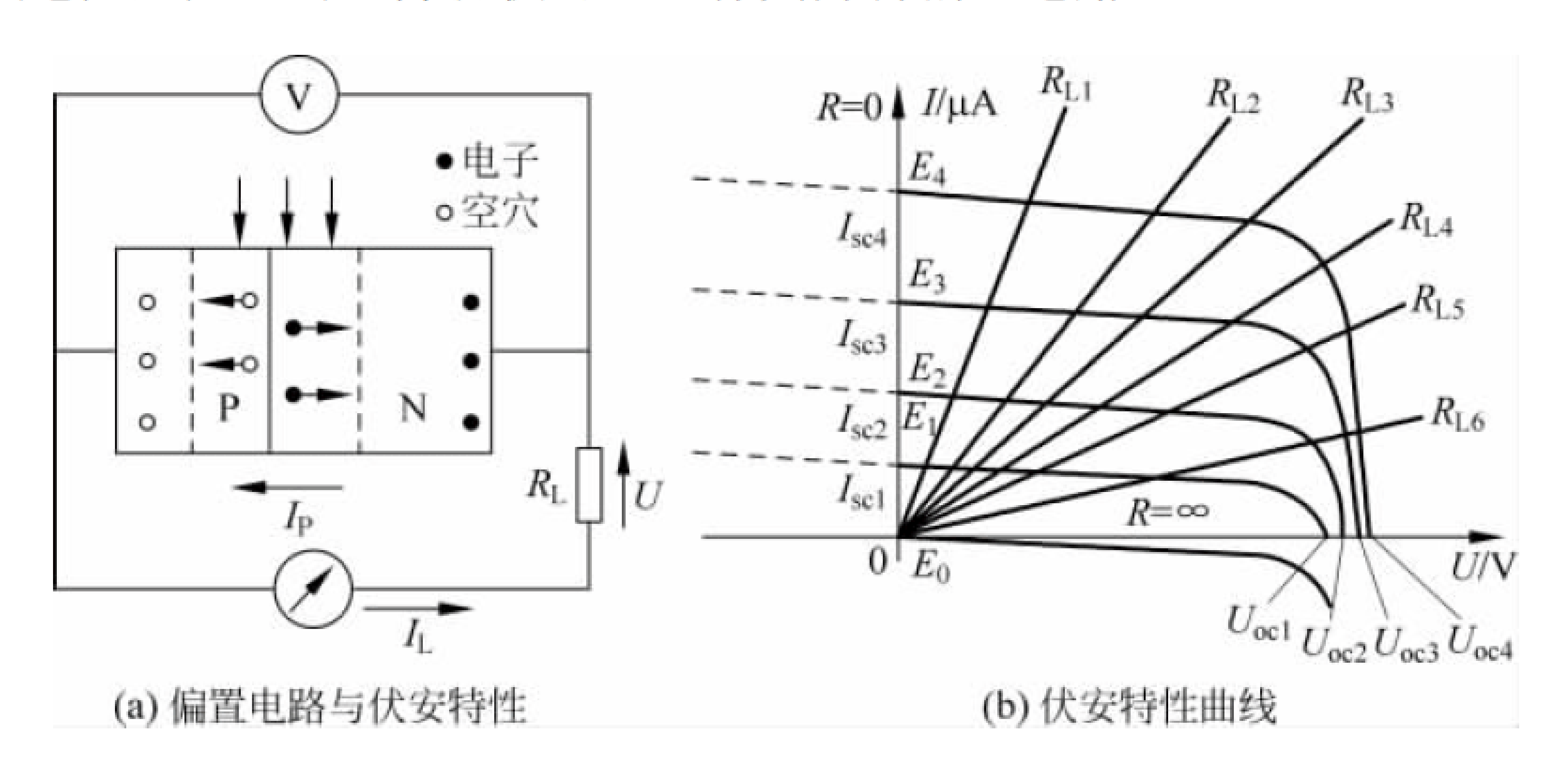



图 4-21-1　硅光电池自偏置电路与伏安特性曲

在自偏置情况下，硅光电池的电流方程为

$$I_P = \frac{\eta q}{h\nu}\phi_{e,\lambda} - I_D\left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1\right) \tag{4-21-1}$$

式中，电压 $U=I_PR_L$，为自偏置电压。流过光电二极管的电流由两部分组成，一部分与入射辐射有关，另一部分与偏置电压（或负载电阻 $R_L$）成指数关系。由此可以得到 $I_P$ 与 $R_L$ 间的关系。如图 4-21-1(b)所示关系曲线应该位于第 4 象限，为方便分析与计算将其旋转到第 1 象限。

当 $R_L=0$ 时，$U=0$ 时，相当于硅光电池处于短路工作状态；短路状态下，流过硅光电池的电流为短路电流 $I_{SC}$，它与入射辐射通量 $\phi_{e,\lambda}$ 的关系为

$$I_P = I_{SC} = \frac{\eta q}{hc}\phi_{e,\lambda} \tag{4-21-2}$$

短路状态下硅光电池的输出功率为零。为自偏置电路的特殊状态（$R_L=0$），工作点位于直角坐标的纵轴上。

另一个特殊状态为 $R\to\infty$，即开路状态。此时，流过硅光电池的电流为零（$I_P=0$），可以推导出开路电压为

$$U_{OC} = \frac{kT}{q}\ln\frac{(I_D + I_{SC})}{I_D} \tag{4-21-3}$$

显然，它应该位于横轴上，与光电流及暗电流成对数关系。同样，开路状态下的输出功率也为零。

但是，当 $0<R_L<\infty$ 时，输出功率 $P_L>0$。$R_L$ 取何值使硅光电池的输出功率最大，是利用硅光电池做电源向负载供电的关键技术。通过实验找到获得最大输出功率的最佳负载电阻 $R_{opt}$，是硅光电池自偏置电路的关键问题。

**2. 反向偏置电路（Reverse bias circuit）**

硅光电池的反向偏置电路与光电二极管的反向偏置电路类似，PN 结所加的外电场方向与内建电场方向相同，使 PN 结区加宽，更有利于漂移运动的光生电子与空穴的运动。只要外加电场足够大，光电流 $I_P$ 只与光度量有关而与外加电压的幅度无关（如图 4-21-1 所示）。

显然，反向偏置下的硅光电池不会对负载输出功率，只能消耗供电电源的功率。

**3. 零伏偏置电路（zero-volt bias circuit）**

硅光电池在零伏偏置状态下具有良好的光电响应特性，它的暗电流为零。这是硅光电池零伏偏置的最大特点。真正绝对零伏偏置的电路是不存在的，但是，可以制作出近似的零伏偏置电路。如图 4-21-2 所示的电路为典型的硅光电池零伏偏置电路。图中，用高增益的高阻抗运算放大器构成闭环放大电路对硅光电池的等效输入电阻 $R_I$ 接近于零，使电路近似为硅光电池的零伏偏置电路。

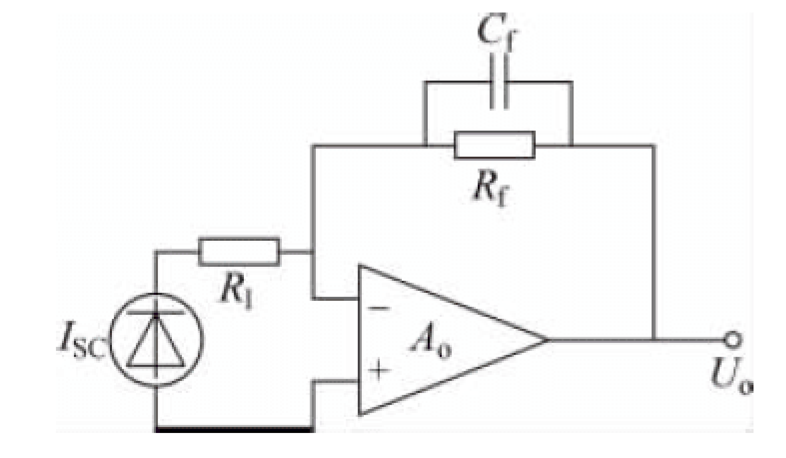


图 4-21-2　硅光电池零伏偏置

## 三、实验仪器（experimental device）

光电综合实验平台主机 1 台、光电池实验装置及其夹持装置、LED 光源及其夹持装置。

## 四、实验内容(experimental content)

**1. 认识光电池(如何判别光电池的正负极)**

光电池从外形上看无法判别管脚的正负极。常用判别方法：用电压表接到硅光电池的2只引脚，将光电池置于白天的室外阳光下，电压表将会有电压显示。当电压显示为正时，正表笔(红表笔)的端子接的是光电池的正极，负表笔(黑表笔)的端子接的是光电池的负极；反之，当电压显示为负值时，正表笔(红表笔)的端子接的是光电池的是负极，负表笔(黑表笔)的端子接的是光电池的正极。

**2. 自偏置电路的输出特性与最佳负载电阻的测量**

1) 自偏置电路的输出特性

(1) 先将硅光电池装置和LED光源装置牢靠地安装到光学台上，如图4-21-3所示。将LED光源的供电电源线串接一只数字毫安表及可调电阻，使其发出的光能调整，并能够入射到硅电池敏感面上，再按照图4-21-1所示的电路连接成自偏置电路。

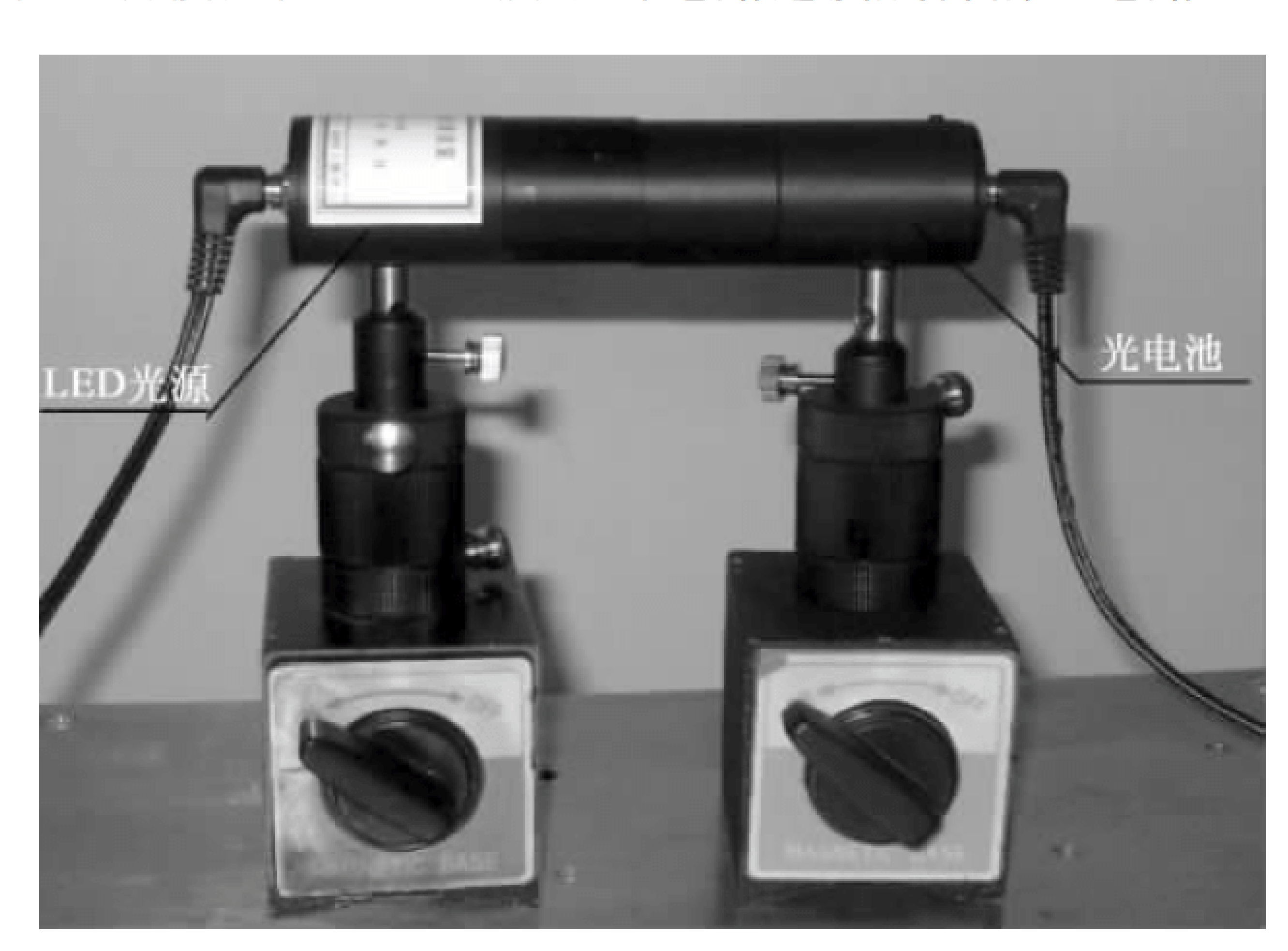



图4-21-3 光电池与LED光源装置

(2) 在做硅光电池特性实验之前需先对LED进行标定，先用可调电位器(综合平台上提供多种可调电位器)调整流过发光二极管的电流 $I_{LED}$，用综合平台提供的数字照度计测量等效落入硅光电池光敏面上的照度(表4-21-1要求的照度值)，电流表的示值 $I_{LED}$。

(3) 将实验平台的开关打开，调整可调电位器，使电流表的示值为期望值，读出电流值 $I_{LED}$，并锁定。用不同阻值的负载电阻接入自偏电路。记录流过硅光电池的电流 $I_P$，计算输出功率 $P$，将 $I_P$ 与 $P$ 填入表4-21-1中。

(4) 改变 $I_{LED}$ 的值(相当于改变照度)，再测一组流过硅光电池的电流 $I_P$ 和对应的输出功率 $P$，填入表4-21-1中。

2) 测量最佳负载电阻

从表4-21-1中可以看出，硅光电池在某照度下输出的功率 $P$ 随负载电阻 $R_L$ 的变化而变化；而且，总存在这样的负载电阻 $R_L$，它所对应的输出功率最大，该负载电阻被称为最佳

负载电阻，记作 $R_{opt}$。对应不同照度下的最佳负载电阻 $R_{opt}$ 的阻值不同，通过实验可以找到最佳负载电阻 $R_{opt}$ 与入射辐射的关系。

利用综合实验平台所提供的条件，并将负载电阻 $R_L$ 用电位器代替，重复自偏置电路的实验，测量出不同负载电阻下的输出功率，找到输出功率最大时的电阻值即为最佳负载电阻。当然也可以先测出硅光电池的伏安特性曲线测量出最佳负载电阻 $R_{opt}$。

3）硅光电池的零伏偏置电路

在光电综合实验平台中找到任意一个放大器和输入电阻 $R_f$，将其连接成如图 4-21-2 所示的零伏偏置电路。将相应的测量仪表也连接好。自行检查无误后，打开光电综合实验平台的电源，将 LED 照明光源与硅光电池装成如图 4-21-3 所示，将已知照度的光投射到硅光电池的光敏面上。

用实验平台提供的数字电压表测量零伏偏置电路的输出电压 $U_o$，测量流过数字电流表的电流 $I_{LED}$，通过改变 $I_{LED}$ 改变硅光电池光敏面上的照度，测出输出电压与入射光照的关系。并画出 $U_o$ 与 $I_{LED}$ 的关系曲线。

4）硅光电池的反向偏置电路

从实验平台备件箱中取出装有硅光电池的探头，按如图 4-21-4 所示的电路连接，由于加在硅光电池两端的电场与硅光电池 PN 结的内建电场的方向相同，阻挡扩散电荷的运动而有利于漂移运动，因此称其为反向偏置电路。

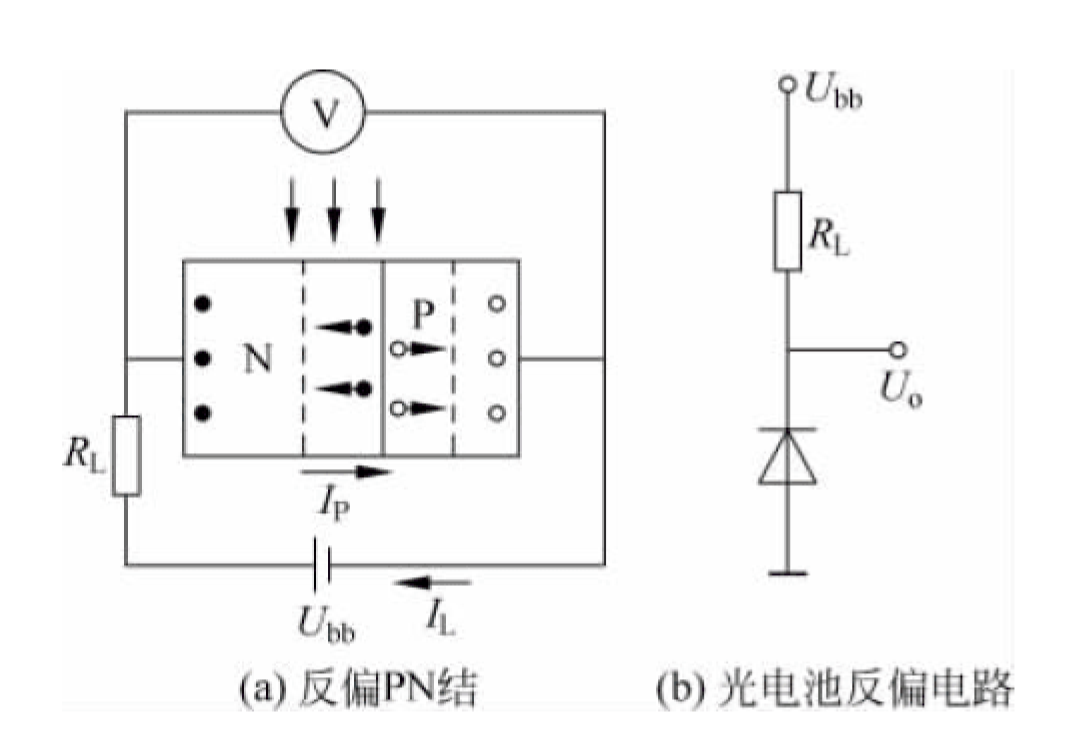



图 4-21-4　光电池反向偏置电路

将 LED 光源与硅光电池探头按如图 4-21-3 所示的结构稳固地安装在光学平台上。并用实验平台上的数字电压表测量输出电压 $U_o$。

如果反向偏置电路如图 4-21-4(b)所示，输出电压 $U_o$ 应为电源电压 $U_{bb}$ 与光生电流 $I_P$ 在负载电阻 $R_L$ 两端产生的压降 $I_P R_L$ 之差，即

$$U_o = U_{bb} - I_P R_L = U_{bb} - R_L S_I \phi_{v,\lambda} \tag{4-21-4}$$

式中 $R_L$ 为负载电阻；由式(4-21-4)可见，输出电压与入射辐射 $\phi_{e,\lambda}$ 的变化方向相反。

实验时，先打开综合平台的电源，然后调整光源的电流 $I_{LED}$，使入射的光通量 $\phi_{v,\lambda}$ 或照度 $E_{v,\lambda}$ 为适当值，测出此时的光电流 $I_P$ 与输出电压 $U_o$ 值，填入表 4-21-2 中；再改变 LED 光源的电流值，测得另一组数据，填入表 4-21-2。

最终测得 5 组数据，根据所测数据，在直角坐标系上画出不同的光照特性曲线。

5）测量硅光电池反向偏置状态下的时间响应

测量硅光电池反向偏置状态下时间响应的测量电路如图 4-21-5 所示，用示波器探头 CH1 测量 LED 发光管的驱动脉冲，用探头 CH2 测量光电池反向偏置电路的输出信号 $U_o$，并将输入与输出分别送入到光电综合实验平台的数据采集系统中，由实验平台提供的数据采集软件在计算机上显示出两个波形间的相位差及其时间延迟特性曲线，由延迟特性曲线可以测量出光电池在反向偏置状况下的时间响应特性曲线。

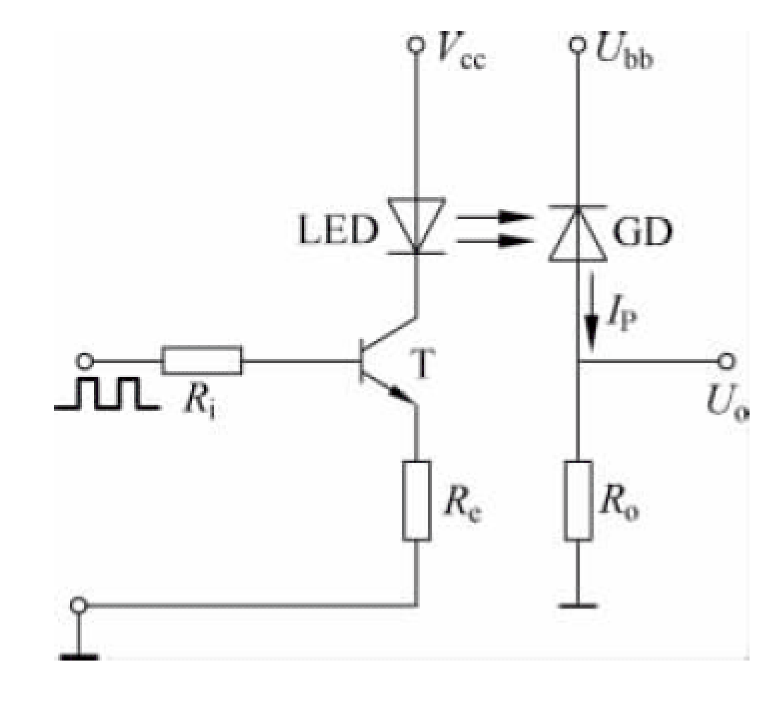



图 4-21-5 光电池反偏时间响应测量电路

实验时，因所用硅光电池的面积不同，时间响应的差距可能很大，应适当调整采样频率，使观测效果最佳，能够读出它的上升时间 $t_{on}$ 与下降时间 $t_{off}$。

## 五、数据记录与数据处理(data recording and processing)

### 1. 数据记录(data recording)

表 4-21-1 硅光电池自偏置电路的测量数据

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 照度 $E_v=50$lx | 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | $R_L$/kΩ | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.5 | 7 | 3.6 | 5.1 |
| | $I_P$/μA | | | | | | | | |
| 输出功率 $P$/W | | | | | | | | | |
| $E_v=100$lx | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| 输出功率 $P$/W | | | | | | | | | |

表 4-21-2 在一定电源电压下确定光通量的伏安特性曲线

| 电流 | 电压 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $U_1$ | $U_2$ | $U_3$ | $U_4$ | $U_5$ | $U_6$ |
| $I_1$ | | | | | | |
| $I_2$ | | | | | | |
| $I_3$ | | | | | | |
| $I_4$ | | | | | | |
| $I_5$ | | | | | | |

### 2. 数据处理(data processing)

(1) 根据表 4-21-1 的数据计算输出功率 $P$，计算出不同照度下的最佳负载电阻。

(2) 根据表 4-21-1 中的值在图 4-21-6 所示的直角坐标系上找到相应的点，并将各点连

接起来形成如图 4-21-1(b)所示的伏安特性曲线。

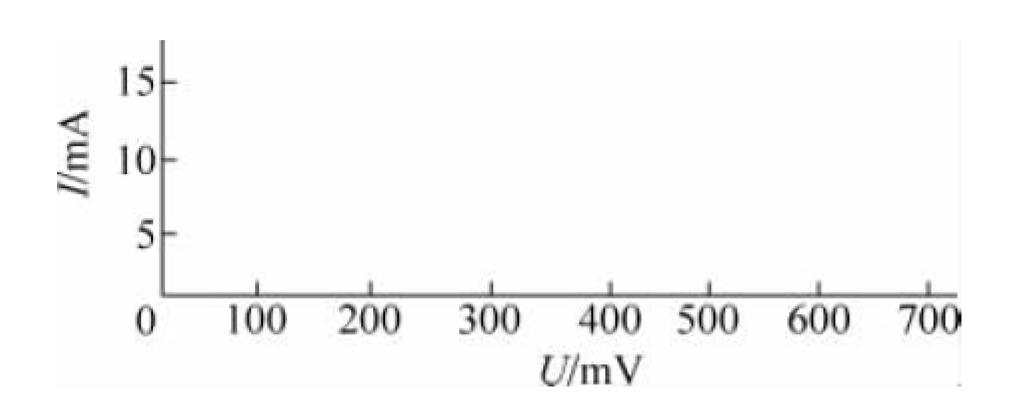



图 4-21-6　硅光电池伏安特性曲线坐标

(3) 根据表 4-21-2 的数据画出硅光电池反偏特性曲线

## 六、注意事项(cautions)

1. 硅光电池的正负极不要接反。
2. 连接电路时平台电源要关闭。

## 七、思考题(exercises)

1. 实验中,选择不同的输入频率对硅光电池的时间响应是否发生影响? 为什么?
2. 如何辨别硅光电池的正负极?

**关键词(key words)**

硅光电池(silicon photocell),电压(voltage),电流(current),偏置电路(bias circuit),频率(frequency),PN 结(PN junction),二极管(diode)

# 第 5 章

# 综合设计性实验

## 实验二十二　三线摆法测量物体的转动惯量

### 一、实验目的(experimental purpose)

1. 学会用三线摆测量物体的转动惯量。
2. 学会用积累放大法测量扭摆运动的周期。
3. 验证转动惯量的平行轴定理。

### 二、实验仪器(experimental device)

转动惯量测试仪、计时器、圆环、圆柱体、游标卡尺、米尺、水平仪。

### 三、设计要求(design requirements)

1. 用三线摆测定圆环对通过其质心且垂直于环面轴的转动惯量。
2. 用三线摆验证平行轴定理。

### 四、实验提示(tips for experiment)

三线扭摆是测量物体转动惯量的常用仪器之一。三线扭摆的示意图如图 5-22-1 所示。它由上、下两个圆盘用三条等长弦线连接而成,每个圆盘上的三个悬点分别组成等边三角形。将两圆盘盘面调节成水平,此时下圆盘可绕两圆盘圆心的连线 $OO'$ 作扭转振动。当扭转角度不大($<5°$)时,理论上可以证明,下圆盘绕 $OO'$ 的转动惯量 $J_0$ 为

$$J_0 = \frac{m_0 gRr}{4\pi^2 H} T_0^2 \qquad (5\text{-}22\text{-}1)$$

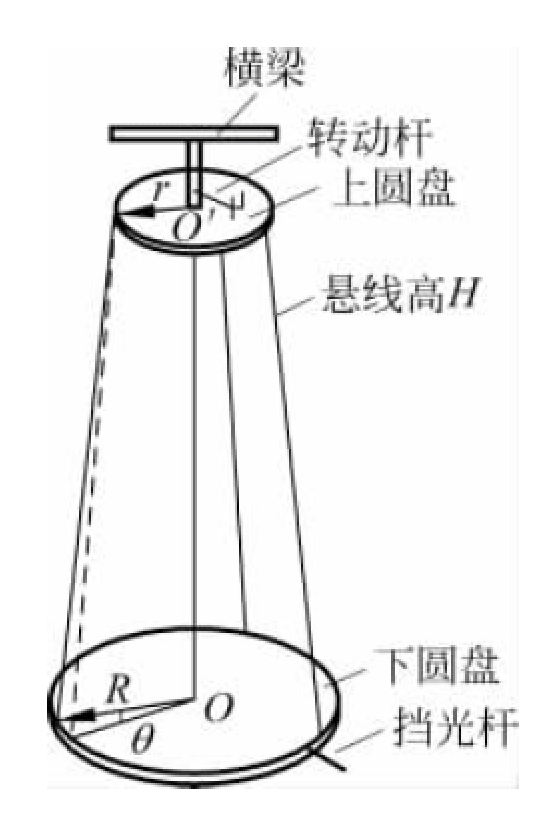



图 5-22-1　三线扭摆示意图

式中，$r$ 和 $R$ 分别为上、下圆盘悬点到转轴 $OO'$ 的距离；$H$ 为两盘间的距离；$m_0$ 为下圆盘的质量；$T_0$ 为扭摆振动的周期。由式(5-22-1)可见，只要测出 $r$，$R$，$H$，$m_0$ 和 $T_0$，就可算出下圆盘绕 $OO'$ 轴的转动惯量 $J_0$。

如果在下圆盘上放上一个质量为 $m_1$ 的待测圆环，使待测圆环的几何轴与 $OO'$ 轴重合。测出它们绕中心轴 $OO'$ 的扭转振动周期 $T$，则它们总得转动惯量 $J$ 为

$$J=\frac{(m_0+m_1)gRr}{4\pi^2 H}T^2 \tag{5-22-2}$$

那么待测圆环绕几何轴的转动惯量 $J_1$ 为

$$J_1=J-J_0 \tag{5-22-3}$$

## 五、参考指南(references)

[1] 贾小兵，杨茂田，殷洁，等. 大学物理实验教程[M]. 北京：人民邮电出版社，2003.
[2] 张旭. 大学物理实验指导[M]. 2 版. 天津：天津大学出版社，2014.

## 六、实验报告要求(requirements of laboratory report)

1. 写明实验的目的、意义。
2. 简述实验的设计原理。
3. 画出三线摆实验示意图。
4. 分析实验中的不确定度，说明实验方法的可行性。
5. 对转动惯量的测量值和实验值进行比较。

**关键词(key words)**

三线摆(trilinear pendulum)，转动惯量(moment of inertia)，周期(period)，质心轴(center-of-mass axis)

# 实验二十三　电表内阻的测量

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 了解一个物理量有不同的测量方法,学会选择最佳的测量方法;
2. 学习测量电路的设计和测量条件的选择。

## 二、实验仪器(experimental device)

待测电表、电阻箱、滑线变阻器、直流稳压电源、导线若干、单刀开关两个。

## 三、设计要求(design requirements)

1. 分别设计出利用替代法、半偏法测量电表内阻的实验。要求:
(1) 分析电路产生不确定度的来源,提出减小不确定的方法;
(2) 考虑如何选择线路元件参数使系统误差最小。
2. 从指示仪表或测量仪表的灵敏度的角度研究线路元件参数对灵敏度的影响,选择具有最佳灵敏度的参数进行测量。
3. 比较两种方法,分析各种方法的优缺点。

## 四、实验提示(tips for experiment)

1. 替代法测量表头内阻原理参照第3章的实验六。

2. 半偏法测量表头内阻,如图5-23-1所示,G为待测电表,mV为毫伏表,$R_0$为电阻箱,$R'$为保护电阻。实验时,$R'$调至最大阻值,$R_0$调到较小的阻值$R_1$。先调节$R$,再调节$R'$,使G的指针满偏(通过它的电流为$I_g$),记下毫伏表的读数$U=I_g(R_1+R_g)$;调节$R_0$及$R$,使检流计的指针达到半偏,而毫安表读数不变,这时电阻箱示数为$R_2$,有$U=\frac{1}{2}I_g(R_2+R_g)$,因此可得

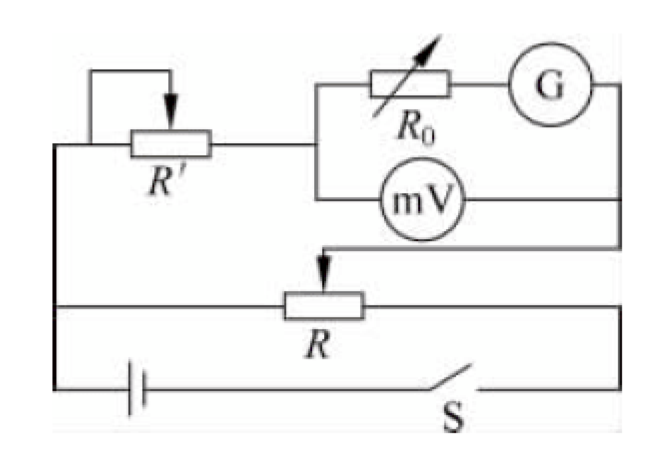


图5-23-1　电压控制半偏法测表头内阻

$$R_g = R_2 - 2R_1 \qquad (5\text{-}23\text{-}1)$$

## 五、参考指南(references)

[1] 杨述武.普通物理实验(二)[M].3版.北京:高等教育出版社,2000.
[2] 邓金祥,刘国庆等.大学物理实验[M].北京:北京工业大学出版社,2005.
[3] 贾小兵,葛智勇.大学物理实验教程[M].2版.北京:人民邮电出版社,2007.

## 六、实验报告要求(requirements of laboratory report)

1. 写明实验的目的、意义。
2. 阐述实验的设计原理,画出电路图。
3. 写出具体的测量实验步骤。
4. 分析指示仪表的灵敏度大小对测量结果的影响。
5. 对测量的结果进行分析和评价,指出各种方法的优缺点。

**关键词(key words)**

替代法(substitution method ),半偏法(half-deflexion method),电阻(resistance),灵敏度(sensitivity)

# 实验二十四　用分立器件设计电表的扩大量程实验

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 学会扩大电流的量程。
2. 学会把微安表改装成电压表。
3. 计算电表的准确度等级。

## 二、实验仪器(experimental device)

直流电源,微安表,开关若干,导线若干,变阻箱,标准电压表,标准电流表

## 三、设计要求(design requirements)

1. 用替代法测量微安表的内阻。
2. 设计电路,改装成大量程电流表。
3. 设计电路,改装成大量程电压表。

## 四、实验提示(tips for experiment)

本实验所涉及的原理参考第 3 章实验六的原理。

## 五、参考指南(references)

[1]　陈巧玲,郭绍忠,杨晓峰.大学物理实验[M].北京:清华大学出版社,2012.
[2]　丁红旗,张清,王爱群.大学物理实验[M].北京:清华大学出版社,2010.

## 六、实验报告要求(requirements of laboratory report)

1. 写明实验的目的、意义。
2. 简述实验的设计原理。
3. 画出改装的电路图。
4. 分析电表的准确度等级。
5. 对改装表的电流值和电压值分别标准表的电流值和电压值进行比较。

**关键词(key words)**

直流电源(Dc power supply),微安表(Micro ammeter),开关(switch),变阻箱(variable resistance box)

# 实验二十五　研究光栅的特性

衍射光栅是指刻有平行、等高而又等间距的多狭缝的光学元件。它是一个重要的分光元件，可用于研究复色光谱的组成，进行光谱分析。还可以通过光栅获得特定波长的单色光。

光栅按衍射条件分类，可分为透射光栅和反射光栅；按其结构分类，又可分为平面光栅、阶梯光栅和凹凸光栅。

## 一、实验目的（experimental purpose）

1. 通过实验加深对理论知识的理解。
2. 掌握测定光学元件特性参数的方法。
3. 深入研究光栅的光学特性。

## 二、实验仪器（experimental device）

除实验室给定的不同光栅常数的全息光栅外，其他的实验器材自行拟定后，向实验室提出申请使用。

## 三、设计要求（design requirements）

1. 利用所给的光栅测量钠光灯的钠双线波长，或氦-氖激光器的激光波长，或汞灯谱线的各个波长，要求测量结果的相对误差小于等于 0.1%。

2. 测出所给衍射光栅的四个主要性能参数：光栅常数 $d$，角色散率 $\psi$，分辨本领 $R$ 和衍射效率 $\eta$。

3. 从理论上算出，在给定的光栅和波长（汞灯）的条件下，能观察到的光栅最高衍射级数 $k$，并用实验进行验证。

## 四、实验提示（tips for experiment）

根据夫琅禾费光栅衍射理论，当一束平行光垂直入射到光栅平面上时，将发生衍射。衍射光波中亮条纹的位置由下列方程 $d\sin\varphi=k\lambda(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$决定，其中 $d$ 称为光栅常量，$\varphi$ 为衍射角，$k$ 为衍射光谱的级数，$\lambda$ 为入射光的波长。有关光栅的几个特性参数说明如下：

（1）光栅常量 $d$。$d=a+b$，$a$ 为光栅狭缝宽度，$b$ 为相邻狭缝间不透明部分宽度。

（2）角色散率 $\varphi$。$\varphi=\dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}\lambda}$，定义为单位波长间隔内两谱线之间的衍射角之差。由 $d\sin\varphi_k=k\lambda$，可知 $\varphi=\dfrac{k}{d\cos\varphi_k}$。

（3）分辨本领 $R$。$R=\frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda}$，定义为两条刚刚可以被分开的谱线的波长差除平均波长。根据瑞利条件，所谓两条刚刚可以被分开的谱线可规定为：波长相差 $\Delta\lambda$ 的两条相邻谱线，其中一条谱线的最亮处应落在另一条谱线的最暗处。可以证明，对于宽度一定的光栅，$R$ 的理论极限值 $R_m=kN=k\frac{L}{d}$，而实测值将小于 $kN$。式中，$k$ 为光谱级数，$N$ 为参加衍射的光栅狭缝数，$L$ 为入射光束范围内的光栅宽度，$d$ 为光栅常量。

（4）衍射效率 $\eta$。$\eta=\frac{I_1}{I_0}\times100\%$，$I_1$ 为第一衍射级光谱的强度，$I_0$ 为零级光谱的强度。

## 五、参考指南（references）


[1] 林抒，龚镇雄. 普通物理实验[M]. 北京：高等教育出版社，1981.

[2] 母国光，战元龄. 光学[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，2009.


## 六、实验报告要求（requirements of laboratory report）

1. 写明实验的目的、意义。
2. 简述实验的设计原理。
3. 进行实验过程的详细记录及数据处理。
4. 记录实验中发现的问题及解决方法。
5. 对实验结果进行分析和讨论。
6. 谈谈对本实验的收获、体会和改进意见。

**关键词（key words）**

全息光栅（holographic grating），光栅常数（grating constant），衍射（diffraction），角色散率（angular dispersive index），分辨本领（resolving power）

# 实验二十六　细丝直径的测量和工件表面平整度的检验

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 通过实验学会用等厚干涉的概念测量细丝直径和检验工件表面平整度。
2. 加深对光学干涉原理的认识。

## 二、实验仪器(experimental device)

读数显微镜,单色光源,细丝,工件,劈尖装置

## 三、设计要求(design requirements)

1. 根据实验室提供的仪器设备,选定一种测量方法,测量细丝直径和检验工件表面平整度。
2. 针对实验过程,分析影响实验结果精确度的主要因素,提出可行性的改进方案。

## 四、实验提示(tips for experiment)

**1. 测量细丝直径的原理**

将两片很平的玻璃叠放在一起,一端用细丝将其隔开,两玻璃片之间就形成一个空气劈尖(见图 5-26-1)。在单色光束垂直照射下,经劈尖上、下表面反射后两束反射光是相干的,干涉条纹将是间隔相等且平行于二玻璃交线的明暗交替的条纹(见图 5-26-2)。

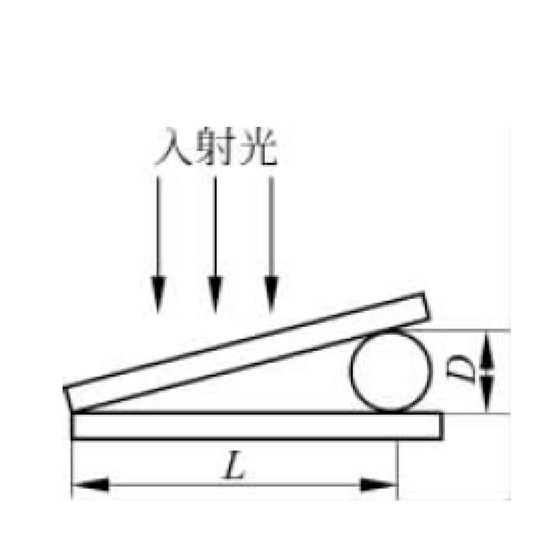



图 5-26-1　劈尖等厚干涉

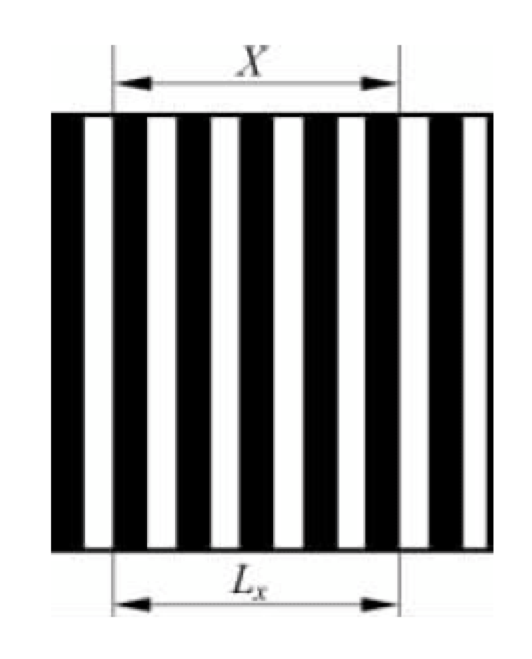



图 5-26-2　等厚干涉条纹

显然,劈尖薄膜上下两表面反射的两束光发生干涉的光程差为

$$\delta = 2h + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \tag{5-26-1}$$

其中 $h$ 为空气薄膜厚度,$k=1,2,3,\cdots$时,干涉条纹为暗纹与 $m$ 级暗条纹的薄膜厚度为

$$h_m = m\frac{\lambda}{2} \tag{5-26-2}$$

两相邻暗条纹对应的空气薄膜厚度差为

$$h_{m+1} - h_{m-1} = \frac{\lambda}{2} \tag{5-26-3}$$

如果有两玻璃板交线处到细丝处的劈尖面上共有 $N$ 条干涉条纹，则细丝的直径 $D$ 为

$$D = N(\lambda/2) \tag{5-26-4}$$

由于 $N$ 数目很大，实验测量不方便，为了避免数错，在实验可测出某长度 $L_x$ 内的干涉条纹间隔数 $X$，则可测出单位长度的条纹数 $n=\frac{X}{L_x}$，测出两玻璃交线处至细丝的距离 $L$，则

$$N = nL \tag{5-26-5}$$

$$D = \frac{X}{L_x}L(\lambda/2) \tag{5-26-6}$$

已知入射光波长 $\lambda$，只需测出 $X$ 和 $L_x$，就可计算出细丝的直径 $D$。

**2. 工件表面平整度检测的基本原理**

若平玻璃板下表面是完全平的，工件表面也是平的，则空气劈尖的等厚干涉条纹应为平行于棱边的直条纹。若条纹有弯曲，并且是局部弯向棱边的方向，说明在工件表面的相应位置处有一条垂直于棱边的不平的刻痕，如图 5-26-3 所示。根据等厚干涉条纹的特点，同一条纹对应相同的薄膜厚度，因而可以知道，越靠近棱边膜的厚度越小。现在在同一条纹上近棱边处和远棱边处的厚度相等，说明工件表面的纹路是凹下去的。若凹下去的深度是 $h$，那么

$$h = \frac{\lambda a}{2b} \tag{5-26-7}$$

式中，$a$ 是条纹弯曲的深度；$b$ 是条纹间隔，如图 5-26-4 所示。

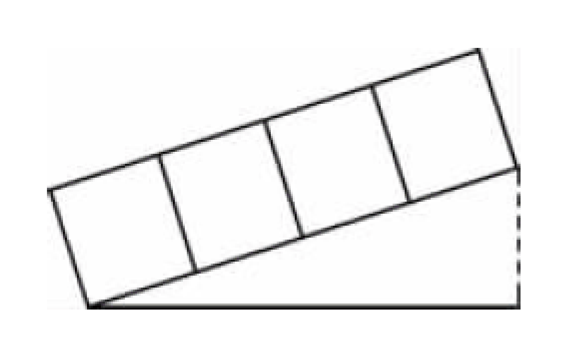


图 5-26-3　工件表面干涉条纹

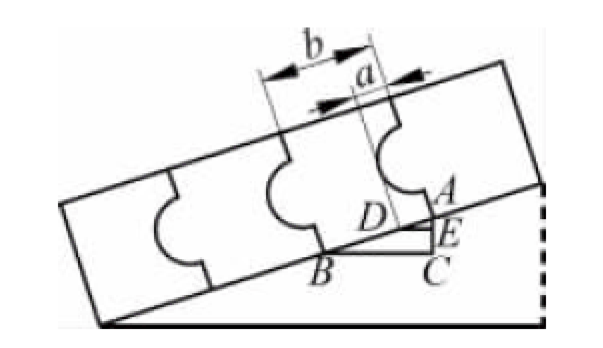



图 5-26-4　工件表面刻痕深度

## 五、参考指南(references)

[1]　缭兴中.大学物理实验教程[M].北京：科学出版社，2006.

[2]　张三慧.大学物理学：波动与光学[M].2 版.北京：清华大学出版社，2000.

## 六、实验报告要求(requirements of laboratory report)

1. 写明实验的目的、意义。
2. 简述实验的设计原理。
3. 进行实验过程的详细记录及数据处理。
4. 记录实验中发现的问题及解决方法。
5. 对实验结果进行分析和讨论。

6. 谈谈对本实验的收获、体会和改进意见。

**关键词(key words)**

光的干涉(interference of light),细丝直径(filaments diameter),劈尖(wedge film),平整度(evenness)

# 实验二十七　光敏电阻光电特性的研究

## 一、实验目的(experimental purpose)

1. 了解光敏电阻的原理和性能。
2. 研究光敏电阻的光电特性。

## 二、实验仪器(experimental device)

光敏电阻、光源(红、蓝、绿、白 LED)、GDS-Ⅲ型光电综合实验平台、光电探测装置、LED 光源装置、导线

## 三、设计要求(design requirements)

1. 测量光敏电阻的暗电阻,环境光照条件下的亮电阻。
2. 根据实验室提供的仪器设备,测量光敏电阻不同光照下的伏安特性。
3. 测量一定电压下,光电流与光照强度的关系曲线。
4. 应用光敏电阻设计路障灯,要求采用直流供电,白天灯自动熄灭,夜间自动点亮。

## 四、实验提示(tips for experiment)

某些物质吸收了光子的能量后,产生本征吸收或杂质吸收,从而改变了物质电导率的现象称为物质的光电导效应。利用具有光电导效应的材料(如硅、锗等本征半导体与杂质半导体)可以制成电导(或电阻)随入射光度量变化的器件,称为光电导器件或光敏电阻。

当光敏电阻受到光的照射时,其材料的电导率发生变化,表现出阻值的变化。光照越强,它的电阻值越低。因此,可以通过一定的电路得到输出信号随光的变化而改变的电压或电流信号。测量信号电压或电流很小。当光敏电阻受到一定波长范围的光照时,它的阻值(亮电阻)将急剧变化,因此电路中电流将迅速增加,便可获得光敏电阻随光或时间变化的特性,即光敏电阻的特性参数。光敏电阻具有以下特性:

**1. 暗电阻、亮电阻**

光敏电阻在室温和全暗条件下测得的稳定电阻值称为暗电阻。此时流过的电流称为暗电流。

光敏电阻在室温和一定光照条件下测得的稳定电阻值称为亮电阻,此时流过的电流称为亮电流。

亮电流与暗电流之差称为光电流。显然,光敏电阻的暗阻越大越好,而亮电阻越小越好。也就是说,暗电流要小,亮电流要大,这样光敏电阻的灵敏度就高。

**2. 伏安特性**

在一定照度下,光敏电阻两端所加的电压与流过光敏电阻的电流之间的关系,称为伏安

特性。光敏电阻伏安特性近似直线，而且没有饱和现象。受耗散功率的限制，在使用时，光敏电阻两端的电压不能超过最高工作电压。

**3. 光照特性**

光敏电阻的光电流与光照度之间的关系称为光电特性。光敏电阻的光电特性呈非线性，因此不适宜做检测元件，这是光敏电阻的缺点之一，在自动控制中它常用做开关式光电传感器。

**4. 光谱特性**

对于不同波长的入射光，光敏电阻的相对灵敏度是不相同的。因此在选用光敏电阻时应当把元件和光源的种类结合起来考虑才能获得满意的结果。

## 五、参考指南（references）


[1] 杨东，轩克辉，董雪峰. 光敏电阻的特性及应用研究[J]. 山东轻工业学院学报，2013，2(5)：49-52.

[2] 孙宝光，刘春兰. 小光强单色光照射下的光敏电阻特性研究[J]. 大学物理实验，2015，28(4)：31-33.

[3] 王凌波. 基于光敏电阻特性的光控灯实验平台设计[J]. 兰州石化职业技术学院学报，2015，15(4)：23-25.

[4] 王庆有. 光电信息综合实验与设计教程[M]. 北京：电子工业出版社，2010.


## 六、实验报告要求（requirements of laboratory report）

1. 写明实验的目的、意义。
2. 简述实验的设计原理。
3. 进行实验过程的详细记录及数据处理。
4. 记录实验中发现的问题及解决方法。
5. 对实验结果进行分析和讨论。
6. 谈谈对本实验的收获、体会和改进意见。

**关键词（key words）**

光敏电阻（photosensitive resistance），伏安特性（volt-ampere characteristic ），光照特性（light characteristic）

# 参 考 文 献

[1] 郑建洲，张萍，等. 大学物理实验[M]. 北京：科学出版社，2007.
[2] 张昱，李端勇，等. 大学物理实验——基本篇[M]. 4 版. 北京：科学出版社，2014.
[3] 陈金太. 大学物理实验[M]. 3 版. 厦门：厦门大学出版社，2013.
[4] 邓金祥，刘国庆，等. 大学物理学实验[M]. 北京：北京工业大学出版社，2005.
[5] 李寿松. 物理实验教程[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，2003.
[6] 郑林，许济金，邱祖强，等. 大学物理实验[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，2015.
[7] 汪涛，陶纯匡，王银峰，等. 大学物理实验[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2015.
[8] 张兆奎，缪连元，张立，等. 大学物理实验[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，2001.
[9] 周瑞华，汤照，等. 大学物理实验教程[M]. 北京：国防工业出版社，2010.
[10] 张映辉，郭彦青，等. 大学物理实验[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

# 附录 1　中华人民共和国法定计量单位

1948 年召开的第九届国际计量大会要求国际计量委员会创立一种实用计量单位制。1954 年第十届国际计量大会决定采用米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)和坎德拉(cd)作为基本单位。1960 年第十一届国际计量大会决定将上述 6 个基本单位命名为“国际单位制”,并规定其符号为“SI”。1974 年第十四届国际计量大会决定将摩尔(mol)增加为基本单位。因此,目前国际单位制共有 7 个基本单位。另外还规定了 2 个辅助单位,即弧度(平面角单位)、球面度(立体角单位)。其他单位均由这些基本单位和辅助单位导出。

1954 年国际度量衡会议决定,自 1978 年 1 月 1 日起实行国际单位制,简称国际制,国际代号为 SI。我国国务院于 1977 年 5 月 27 日颁发《中华人民共和国计量管理条例(试行)》,其中第三条规定:“我国的基本计量制度是米制,逐步采用国际单位制”。

**附表 1-1　国际单位制的基本单位**

| 量的名称 | 单位名称 | 单位符号 | 定　　义 |
|---|---|---|---|
| 长度 | 米 | m | 米是光在真空中于 1/299 792 458s 时间间隔内所经路径的长度 |
| 质量 | 千克 | kg | 千克是质量单位,等于国际千克原器的质量 |
| 时间 | 秒 | s | 铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9,192,631,770 个周期的持续时间为 1s |
| 电流 | 安培 | A | 在两条置于真空中的,相互平行,相距 1m 的无限长而圆截面可以忽略的导线中,通以强度相同的恒定电流,若导线每米长所受的力为 $2\times10^{\pm7}$N,则导线中的电流强度为 1A |
| 热力学温度 | 开尔文 | K | 热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 1/273.16,简称开 |
| 物质的量 | 摩尔 | mol | 摩尔简称摩,是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg $^{12}C$ 的原子数目相等 |
| 发光强度 | 坎德拉 | cd | 简称坎,一个光源在给定方向上的发光强度。该光源发出的频率为 $540\times10^{12}$赫兹的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为瓦特每球面度 |

**附表 1-2　国际单位制的辅助单位**

| 量的名称 | 单位名称 | 单位符号 | 定　　义 |
|---|---|---|---|
| 平面角 | 弧度 | rad | 弧度是一个圆内两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等 |
| 立体角 | 球面角 | sr | 球面度是一个立体角,其顶点位于球心,而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积 |

附表 1-3 国际单位制词头

| 因 数 | 词头名称 | 符 号 | 因 数 | 词头名称 | 符 号 |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{18}$ | 艾[可萨](wexa) | E | $10^{-1}$ | 分(deci) | d |
| $10^{15}$ | 拍[它](peta) | P | $10^{-2}$ | 厘(centi) | c |
| $10^{12}$ | 太[拉](tera) | T | $10^{-3}$ | 毫(milli) | m |
| $10^{9}$ | 吉[咖](giga) | G | $10^{-6}$ | 微(micro) | $\mu$ |
| $10^{6}$ | 兆(mega) | M | $10^{-9}$ | 纳[诺](nano) | n |
| $10^{3}$ | 千(kilo) | k | $10^{-12}$ | 皮[可](wexa) | p |
| $10^{2}$ | 百(hecto) | h | $10^{-15}$ | 飞[母托](femto) | f |
| $10^{1}$ | 十(deca) | da | $10^{-18}$ | 阿[托](atto) | a |

附表 1-4 可与国际单位并用的我国法定计量单位

| 物理量名称 | 符 号 | 单 位 名 称 | 单 位 符 号 |
|---|---|---|---|
| 长度 | $L,l$ | 米 | m |
| 面积 | $S$ | 平方米 | $m^2$ |
| 体积 | $V$ | 立方米 | $m^3$ |
| 时间 | $t$ | 秒 | s |
| [平面]角 | $\alpha,\beta,\gamma,\theta,\phi$ 等 | 弧度 | rad |
| 速度 | $v,u,c$ | 米每秒 | $m\cdot s^{-1}$ |
| 加速度 | $a$ | 米每二次方秒 | $m\cdot s^{-2}$ |
| 角速度 | $\omega$ | 弧度每秒 | $rad\cdot s^{-1}$ |
| 角加速度 | $\alpha$ | 弧度每二次方秒 | $rad\cdot s^{-2}$ |
| 质量 | $m$ | 千克 | kg |
| 力 | $F$ | 牛顿 | N |
| 摩擦因数 | $\mu$ | — | 1 |
| 功 | $W$ | 焦耳 | J |
| 能量 | $E,E_k,E_p$ | 焦耳 | J |
| 功率 | $P$ | 瓦特 | W |
| 动量 | $P$ | 千克米每秒 | $kg\cdot m\cdot s^{-1}$ |
| 冲量 | $I$ | 牛顿秒 | $N\cdot s$ |
| 力矩 | $M$ | 牛顿米 | $N\cdot m$ |
| 转动惯量 | $J$ | 千克二次方米 | $kg\cdot m^2$ |
| 角动量 | $L$ | 千克二次方米每秒 | $kg\cdot m^2\cdot s^{-1}$ |
| 周期 | $T$ | 秒 | s |
| 频率 | $\nu$ | 赫兹 | Hz |
| 波长 | $\lambda$ | 米 | m |
| 波数 | $k$ | 每米 | $m^{-1}$ |
| 振幅 | $A$ | 米 | m |
| 热力学温度 | $T$ | 开尔文 | K |
| 摄氏温度 | $t$ | 摄氏度 | ℃ |
| 压强 | $p$ | 帕斯卡 | Pa |
| 摩尔质量 | $M$ | 千克每摩尔 | $kg\cdot mol^{-1}$ |
| 物质的量 | $\nu$ | 摩尔 | mol |
| 分子平均自由程 | $\bar{\lambda}$ | 米 | m |

续表

| 物理量名称 | 符　　号 | 单 位 名 称 | 单 位 符 号 |
|---|---|---|---|
| 分子平均碰撞次数 | $\bar{z}$ | 次每秒 | $s^{-1}$ |
| 热量 | $Q$ | 焦耳 | J |
| 摩尔定体热容 | $C_{V,m}$ | 焦耳每摩尔开尔文 | $J \cdot mol^{-1} \cdot K$ |
| 摩尔定压热容 | $C_{p,m}$ | 焦耳每摩尔开尔文 | $J \cdot mol^{-1} \cdot K$ |
| 黏度 | $\eta$ | 次每秒 | $s^{-1}$ |
| 热导率 | $\kappa$ | 千克每米秒 | $kg \cdot m \cdot s^{-1}$ |
| 熵 | $S$ | 焦耳每开尔文 | $J \cdot K^{-1}$ |
| 摩尔气体常数 | $R$ | 焦耳每摩尔开尔文 | $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| 阿伏伽德罗常数 | $N_A$ | 每摩尔 | $mol^{-1}$ |
| 玻尔兹曼常数 | $k$ | 焦耳每开尔文 | $J \cdot K^{-1}$ |
| 电量 | $Q,q$ | 库仑 | C |
| 电流 | $I,i$ | 安培 | A |
| 电流密度 | $j$ | 安培每平方米 | A |
| 电荷线密度 | $\lambda$ | 库仑每米 | $C \cdot m^{-1}$ |
| 电荷面密度 | $\sigma$ | 库仑每平方米 | $C \cdot m^{-2}$ |
| 电荷体密度 | $\rho$ | 库仑每立方米 | $C \cdot m^{-3}$ |
| 电场强度 | $E$ | 伏特每米 | $V \cdot m^{-1}$ |
| 电势 | $V$ | 伏特 | V |
| 真空介电常数 | $\varepsilon_0$ | 法拉每米 | $F \cdot m^{-1}$ |
| 相对电容率 | $\varepsilon_r$ | — | — |
| 电偶极矩 | $P$ | 库仑米 | $C \cdot m$ |
| 电极化强度 | $P$ | 库仑每平方米 | $C \cdot m^2$ |
| 电位移 | $D$ | 库仑每平方米 | $C \cdot m^2$ |
| 电位移通量 | $\Phi_e$ | 库仑 | C |
| 电容 | $C$ | 法拉 | F |
| 电动势 | $\varepsilon$ | 伏特 | V |
| 电阻 | $R$ | 欧姆 | Ω |
| 电阻率 | $\rho$ | 欧姆米 | $\Omega \cdot m$ |
| 磁感应强度 | $B$ | 特斯拉 | T |
| 磁导率 | $\mu$ | 亨利每米 | $H \cdot m^{-1}$ |
| 真空磁导率 | $\mu_0$ | 亨利每米 | $H \cdot m^{-1}$ |
| 相对磁导率 | $\mu_r$ | — | — |
| 磁通量 | $\Phi_m$ | 韦伯 | Wb |
| 磁化强度 | $M$ | 安培每米 | $A \cdot m^{-1}$ |
| 磁场强度 | $H$ | 安培每米 | $A \cdot m^{-1}$ |
| 自感 | $L$ | 亨利 | H |
| 位移电流 | $I_d$ | 安培 | A |
| 互感 | $M$ | 亨利 | H |
| 电磁能密度 | $\omega$ | 焦耳每立方米 | $J \cdot m^{-3}$ |
| 波长 | $\lambda$ | 米 | m |
| 波速 | $\mu$ | 米每秒 | $m \cdot s^{-1}$ |
| 波的强度 | $I$ | 瓦特每平方米 | $W \cdot m^{-2}$ |

续表

| 物理量名称 | 符　　号 | 单 位 名 称 | 单 位 符 号 |
| --- | --- | --- | --- |
| 光程差 | $\Delta$ | 米 | m |
| 辐射出射度 | $M$ | 瓦特每平方米 | $W \cdot m^{-2}$ |
| 核的结合能 | $E$ | 焦耳 | J |
| 衰变常数 | $\lambda$ | 每秒 | $s^{-1}$ |
| 半衰期 | $\tau$ | 秒 | s |
| 普朗克常数 | $h$ | 焦耳秒 | $J \cdot s$ |
| 量子数 | $n$ | | |
| 里德伯常数 | $R$ | 每米 | $m^{-1}$ |
| 玻尔半径 | $r_1$ | 米 | m |
| 波函数 | $\psi$ | — | — |

# 附录 2　一些常用基本物理常数

附表 2-1　基本的和重要的物理常数表

| 物　理　量 | 符号 | 数　值 | | 不确定度 $/10^{-6}$ |
|---|---|---|---|---|
| | | 计算用值 | 最　佳　值 | |
| 真空中的光速 | $c$ | $3.0\times10^{8}\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ | $299792458\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ | (精确) |
| 真空磁导率 | $\mu_0$ | $4\pi\times10^{-7}\mathrm{N\cdot A^{-2}}$ | $4\pi\times10^{-7}\mathrm{N\cdot A^{-2}}$<br>$1.2566370614\times10^{-6}\mathrm{N\cdot A^{-2}}$ | (精确) |
| 真空电容率 | $\varepsilon_0$ | $8.85\times10^{-12}\mathrm{F\cdot m^{-1}}$ | $8.854187817\times10^{-12}\mathrm{F\cdot m^{-1}}$ | (精确) |
| 万有引力常量 | $G$ | $6.67\times10^{-11}\mathrm{m^3\cdot kg^{-1}\cdot s^{-2}}$ | $6.67259(85)\times10^{-11}\mathrm{m^3\cdot kg^{-1}\cdot s^{-2}}$ | 128 |
| 普朗克常量 | $h$<br>$\hbar$ | $6.63\times10^{-34}\mathrm{J\cdot s}$<br>$1.05\times10^{-34}\mathrm{J\cdot s}$ | $6.6260755(40)\times10^{-34}\mathrm{J\cdot s}$<br>$1.05457266(63)\times10^{-34}\mathrm{J\cdot s}$ | 0.60<br>0.60 |
| 阿伏伽德罗常量 | $N_A$ | $6.022\times10^{23}\mathrm{mol}$ | $6.0221367(36)\times10^{23}\mathrm{mol}$ | 0.59 |
| 摩尔气体常量 | $R$ | $8.31\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$ | $8.314510(70)\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$ | 8.4 |
| 玻尔兹曼常量 | $k$ | $1.38\times10^{-23}\mathrm{J\cdot K^{-1}}$ | $1.380658(12)\times10^{-23}\mathrm{J\cdot K^{-1}}$ | 8.4 |
| 斯特蕃-玻尔兹曼常量 | $\sigma$ | $5.67\times10^{-8}\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}}$ | $5.67051(19)\times10^{-8}\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}}$ | 34 |
| 维恩位移定律常量 | $b$ | $2.897\times10^{-3}\mathrm{m\cdot K^4}$ | $2.897756(24)\times10^{-3}\mathrm{m\cdot K^4}$ | 8.4 |
| 摩尔体积(理想气体，$T=273.15\mathrm{K}$，$p=101325\mathrm{Pa}$) | $V_m$ | $22.4\times10^{-3}\mathrm{m^3\cdot mol^{-1}}$ | $22.41410(19)\times10^{-3}\mathrm{m^3\cdot mol^{-1}}$ | 8.4 |
| 基本电荷 | $e$ | $1.60\times10^{-19}\mathrm{C}$ | $1.60217733(49)\times10^{-19}\mathrm{C}$ | 0.30 |
| 电子质量 | $m_e$ | $9.11\times10^{-31}\mathrm{kg}$ | $9.1093897(49)\times10^{-31}\mathrm{kg}$ | 0.59 |
| 质子质量 | $m_p$ | $1.67\times10^{-27}\mathrm{kg}$ | $1.6726231(10)\times10^{-27}\mathrm{kg}$ | 0.59 |
| 中子质量 | $m_n$ | $1.67\times10^{-27}\mathrm{kg}$ | $1.6749286(10)\times10^{-27}\mathrm{kg}$ | 0.59 |
| 经典电子半径 | $r_e$ | $2.82\times10^{-15}\mathrm{kg}$ | $2.81794092(38)\times10^{-15}\mathrm{kg}$ | 0.13 |
| 玻尔半径 | $a_0$ | $5.29\times10^{-11}\mathrm{m}$ | $5.29177249(24)\times10^{-11}\mathrm{m}$ | 0.045 |
| 电子比荷 | $e/m$ | $1.76\times10^{11}\mathrm{C\cdot kg^{-1}}$ | $1.75881962(53)\times10^{11}\mathrm{C\cdot kg^{-1}}$ | 0.30 |
| 电子磁矩 | $\mu_e$ | $9.28\times10^{-24}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | $9.2847701(31)\times10^{-24}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | 0.34 |
| 质子磁矩 | $\mu_p$ | $1.41\times10^{-26}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | $1.41060761(47)\times10^{-26}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | 0.34 |
| 中子磁矩 | $\mu_n$ | $0.966\times10^{-26}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | $0.96623707(40)\times10^{-26}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | 0.41 |
| 康普顿波长 | $\lambda_c$ | $2.43\times10^{-12}\mathrm{m}$ | $2.42631058(22)\times10^{-12}\mathrm{m}$ | 0.089 |
| 磁通量子，$h/2e$ | $\Phi$ | $2.07\times10^{-15}\mathrm{Wb}$ | $2.06783461(61)\times10^{-15}\mathrm{Wb}$ | 0.30 |
| 玻尔磁子，$e\hbar/2m_e$ | $\mu_B$ | $9.27\times10^{-24}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | $9.2740154(31)\times10^{-24}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | 0.34 |
| 核磁子，$(e\hbar)/(2m_e)$ | $\mu_N$ | $5.05\times10^{-27}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | $5.0507866(17)\times10^{-27}\mathrm{J\cdot T^{-1}}$ | 0.34 |
| 里德伯常量 | $R_\infty$ | $1.097\times10^{7}\mathrm{m}$ | $1.0973731534(13)\times10^{7}\mathrm{m}$ | 0.0012 |
| 原子(统一)质量单位，原子质量常量 | $m_u$ | $1.66\times10^{-27}\mathrm{kg}$<br>$931.5\mathrm{MeV\cdot c^{-2}}$ | $1.6605402(10)\times10^{-27}\mathrm{kg}$ | 0.59 |

续表

| 物理量 | 符号 | 数值 | | 不确定度/$10^{-6}$ |
|---|---|---|---|---|
| | | 计算用值 | 最佳值 | |
| 1 埃 | Å | $1Å=1\times10^{-10}$m | | |
| 1 光年 | l. y. | 1l. y. $=9.46\times10^{15}$m | | |
| 1 电子伏(特) | eV | $1eV=1.602\times10^{-19}$J | | 0.30 |
| 1 特(斯拉) | T | $1T=1\times10^{-4}$G | | |
| 热功当量 | J | $4.186J\cdot cal^{-1}$ | | |
| 标准大气压 | $p_0$ | $101325Pa\times10^{-3}$ | | |
| 冰点绝对温度 | $T_0$ | 273.15K | | |
| 标准状态下声音在空气中传播速度 | $v_0$ | $331.46m\cdot s^{-1}$ | | |
| 钠光谱中黄线波长 | $D$ | $589.3\times10^{-9}$m | | |
| 镉光谱中红线波长 | $\lambda_{cd}$ | $643.84696\times10^{-9}$m | | |

**附表 2-2　在 20℃时常用固体和液体的密度**

| 物质 | 密度 $\rho/(kg\cdot m^{-3})$ | 物质 | 密度 $\rho/(kg\cdot m^{-3})$ |
|---|---|---|---|
| 铝 | 2699 | 水晶玻璃 | 2900～3000 |
| 铜 | 8960 | 窗玻璃 | 2400～2700 |
| 铁 | 7874 | 冰(0℃) | 880～920 |
| 银 | 10500 | 甲醇 | 792 |
| 金 | 19320 | 乙醇 | 789 |
| 钨 | 19300 | 乙醚 | 714 |
| 铂 | 21450 | 汽油 | 710～720 |
| 铅 | 11350 | 氟利昂-12 | 1329 |
| 锡 | 7298 | 变压器油 | 840～890 |
| 水银 | 13546 | 甘油 | 1260 |
| 钢 | 7600～7900 | 蜂蜜 | 1435 |
| 石英 | 2500～2870 | 食盐 | 2140 |

**附表 2-3　液体的黏度**

| 液体 | 温度/℃ | 黏度/($10^{-6}$Pa·s) | 液体 | 温度/℃ | 黏度/($10^{-6}$Pa·s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 汽油 | 0 | 1788 | 甘油 | −20 | $134\times10^6$ |
| | 18 | 530 | | 0 | $121\times10^5$ |
| 甲醇 | 0 | 817 | | 20 | $1499\times10^3$ |
| | 20 | 584 | | 100 | 12945 |
| 乙醇 | −20 | 2780 | 蜂蜜 | 20 | $650\times10^4$ |
| | 0 | 1780 | | 80 | $100\times10^3$ |
| | 20 | 1190 | 鱼肝油 | 20 | 45600 |
| 乙醚 | 0 | 296 | | 80 | 4600 |
| | 20 | 243 | 水银 | −20 | 1855 |
| 变压汽油 | 20 | 19800 | | 0 | 1685 |
| 蓖麻油 | 10 | $242\times10^4$ | | 20 | 1554 |
| 葵花子油 | 20 | 5000 | | 100 | 1224 |

**附表 2-4 不同温度时水的黏度**

| 温度/℃ | $\eta/(10^{-6}\mathrm{Pa\cdot s})$ | 温度/℃ | $\eta/(10^{-6}\mathrm{Pa\cdot s})$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 1787 | 60 | 469 |
| 10 | 1304 | 70 | 406 |
| 20 | 1004 | 80 | 355 |
| 30 | 801 | 90 | 315 |
| 40 | 653 | 100 | 282 |
| 50 | 549 | | |

**附表 2-5 在 20℃ 时某些金属的杨氏模量**

| 金属 | $E$/GPa | $E/(\mathrm{N\cdot m^{-2}})$ |
|---|---|---|
| 铝 | 70.00～71.00 | $(7.000\sim7.1000)\times10^{10}$ |
| 钨 | 415.0 | $4.150\times10^{11}$ |
| 铁 | 190.0～210.0 | $(1.900\sim2.100)\times10^{11}$ |
| 铜 | 105.0～130.0 | $(1.050\sim1.300)\times10^{11}$ |
| 金 | 79.00 | $7.900\times10^{10}$ |
| 银 | 70.00～82.00 | $(7.000\sim8.200)\times10^{10}$ |
| 锌 | 800.0 | $8.000\times10^{10}$ |
| 铬 | 240.0～250.0 | $(2.400\sim2.500)\times10^{11}$ |
| 合金钢 | 210.0～220.0 | $(2.100\sim2.200)\times10^{11}$ |
| 碳钢 | 200.0～210.0 | $(2.000\sim2.100)\times10^{11}$ |
| 康钢 | 163.0 | $1.630\times10^{11}$ |

**附表 2-6 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 $\alpha$**

| 温度/℃ | $\alpha/(10^{-3}\mathrm{N\cdot m^{-1}})$ | 温度/℃ | $\alpha/(10^{-3}\mathrm{N\cdot m^{-1}})$ | 温度/℃ | $\alpha/(10^{-3}\mathrm{N\cdot m^{-1}})$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 75.62 | 16 | 73.34 | 30 | 71.15 |
| 5 | 74.90 | 17 | 73.20 | 40 | 69.55 |
| 6 | 74.76 | 18 | 73.05 | 50 | 67.90 |
| 8 | 74.48 | 19 | 72.89 | 60 | 66.17 |
| 10 | 74.20 | 20 | 72.75 | 70 | 64.41 |
| 11 | 74.07 | 21 | 72.60 | 80 | 62.60 |
| 12 | 73.92 | 22 | 72.44 | 90 | 60.74 |
| 13 | 73.78 | 23 | 72.28 | 100 | 58.84 |
| 14 | 73.64 | 24 | 72.12 | | |
| 15 | 73.48 | 25 | 71.96 | | |

**附表 2-7 在 20℃ 时与空气接触的液体的表面张力系数**

| 液体 | $\sigma/(10^{-3}\mathrm{N\cdot m^{-1}})$ | 液体 | $\sigma/(10^{-3}\mathrm{N\cdot m^{-1}})$ |
|---|---|---|---|
| 航空汽油(在 10℃时) | 21 | 甘油 | 63 |
| 石油 | 30 | 水银 | 513 |
| 煤油 | 24 | 甲醇 | 22.6 |
| 松节油 | 28.8 | (在 0℃时) | 24.5 |
| 水 | 72.75 | 乙醇 | 22.0 |
| 肥皂溶液 | 40 | (在 60℃时) | 13.4 |
| 氟利昂-12 | 9.0 | (在 0℃时) | 24.1 |
| 蓖麻油 | 36.4 | | |

**附表 2-8 部分材料的导热系数**

| 名 称 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 导热系数/(J·s$^{-1}$·m$^{-1}$·K$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 空气(0℃) | | $2.4\times10^{-2}$ |
| 氢气(0℃) | | $1.4\times10^{-1}$ |
| 铝 | | $2.0\times10^{2}$ |
| 铜 | | $3.9\times10^{2}$ |
| 钢 | | $4.6\times10^{1}$ |
| 钢筋混凝土 | 2400 | 1.55 |
| 碎石混凝土 | 2000 | 1.16 |
| 粉煤灰矿渣混凝土 | 1930 | 0.70 |
| 大理石、花岗石、玄武石 | 2800 | 3.49 |
| 砂石、石英石 | 2400 | 2.03 |
| 重石灰石 | 2000 | 1.16 |
| 矿渣砖 | 1400 | $5.8\times10^{-1}$ |
| 砂(湿度<1%) | 1600 | $8.1\times10^{-1}$ |
| 胶合板 | 600 | $17\times10^{-1}$ |
| 软木板 | 180 | $5.6\times10^{-2}$ |
| 沥青油毡 | 600 | $1.7\times10^{-1}$ |
| 石棉板 | 300 | $4.7\times10^{-2}$ |
| 聚氯乙烯(泡沫塑料) | 18.9 | $3.0\times10^{-2}$ |
| 聚氨酯 | 32.4 | $2.0\times10^{-2}$ |

注:有关数据是在正常温度条件下测定,否则将有较大差异。

**附表 2-9 常温下某些物质的折射率**

| 物 质 | $H_\alpha$ 线 ($\lambda$=656.3nm) | $D$ 线 ($\lambda$=589.3nm) | $H_\beta$ 线 ($\lambda$=486.1nm) |
|---|---|---|---|
| 水(18℃) | 1.3314 | 1.3332 | 1.3373 |
| 乙醇(18℃) | 1.3609 | 1.3625 | 1.3665 |
| 冕玻璃(轻) | 1.5127 | 1.5153 | 1.5214 |
| 冕玻璃(重) | 1.6126 | 1.6152 | 1.6213 |
| 燧石玻璃(轻) | 1.6038 | 1.6085 | 1.6200 |
| 燧石玻璃(重) | 1.7434 | 1.7515 | 1.7723 |
| 方解石(寻常光) | 1.6545 | 1.6585 | 1.6679 |
| 方解石(非常光) | 1.4864 | 1.4864 | 1.4908 |
| 水晶(寻常光) | 1.5418 | 1.5442 | 1.5496 |
| 水晶(非常光) | 1.5509 | 1.5533 | 1.5589 |

**附表 2-10 常用光源的光谱波长**

| 光源 | $\lambda$/nm | 光源 | $\lambda$/nm |
|---|---|---|---|
| H(氢) | 656.28 红 | Ne(氖) | 626.65 橙 |
| | 486.13 蓝绿 | | 621.73 橙 |
| | 434.05 紫 | | 614.31 橙 |
| | 410.17 紫 | | 588.19 黄 |
| | 397.01 紫 | | 585.25 黄 |

续表

| 光源 | λ/nm | 光源 | λ/nm |
|---|---|---|---|
| He(氦) | 706.52 红 | Na(钠) | 589.592(D1)黄 |
| | 667.8 红 | | 588.995(D2)黄 |
| | 587.56(D3)黄 | Hg(汞) | 623.44 橙 |
| | 501.57 绿 | | 579.07 黄$_2$ |
| | 492.19 蓝绿 | | 576.96 黄$_1$ |
| | 471.31 蓝 | | 546.07 绿 |
| | 447.15 紫 | | 491.60 蓝绿 |
| | 402.62 紫 | | 435.83 紫$_2$ |
| | 388.87 紫 | | 404.66 紫$_1$ |
| Ne(氖) | 650.65 红 | He-Ne 激光 | 632.8 橙 |
| | 640.23 橙 | Cd(镉) | 643.847 红 |
| | 638.30 橙 | | 508.582 绿 |